

D i s s e r t a t i o n

Entwurfstechnische Grundlagen für ein Fahrerassistenzsystem zur Unterstützung des Fahrers bei der Wahl seiner Geschwindigkeit

Zur Erlangung des akademischen Grades Doktoringenieur (Dr.-Ing.)

vorgelegt der Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“
der Technischen Universität Dresden

von
Dipl.-Ing. Dirk Ebersbach

Gutachter:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christian Lippold, Technische Universität Dresden

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Günter Weise, Dresden

Dr.-Ing. Hans-Joachim Steinle BMW Group

Tag der Einreichung: 27.11.2005

Tag der Verteidigung: 10.07.2006

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl Gestaltung von Straßenverkehrsanlagen an der Technischen Universität Dresden.

Die ersten wissenschaftlichen Grundlagen wurden im Rahmen des Projektes S.A.N.T.O.S erarbeitet. Dies erfolgte noch unter der Leitung von Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Günter Weise. Diese Grundlagen wurden in einer direkten Zusammenarbeit mit der BMW Group weiter entwickelt. Hier gilt mein Dank Herrn Christoph Mayser, der von dem Erfolg des Ansatzes überzeugt war und diesen weit über das S.A.N.T.O.S Projekt hinaus unterstützt hat. Durch diese Unterstützung ist es gelungen, ein Fahrerassistenzsystem zu entwickeln und in einem Fahrzeug umzusetzen.

An der erfolgreichen Umsetzung des Systems waren viele Personen im Rahmen verschiedener Projekte beteiligt. Hier gilt der Dank Herrn Matthias Dietze und Herrn Christian Rucker, die im Rahmen der Projekte aktiv mitgearbeitet haben. In diesem Zusammenhang möchte ich mich auch für den guten Zusammenhalt am Lehrstuhl bei allen Kolleginnen und Kollegen bedanken. Viele Diskussionen und Aufmunterungen haben auch dazu beigetragen, dass diese Arbeit erfolgreich abgeschlossen werden konnte.

Herr Prof. Dr.-Ing. Christian Lippold übernahm die Leitung des Lehrstuhles als Nachfolge von Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Günter Weise. Er war von Anfang an von dem Thema überzeugt und unterstützte dieses Projekt. Für die Übernahme des Erstgutachtens und die direkte Unterstützung möchte ich mich an dieser Stelle bedanken. Herr Prof. Dr.-Ing. habil. Günter Weise übernahm das Zweitgutachten. Für seine tatkräftige Unterstützung bei der Erstellung dieser Arbeit und die vielen fachlichen Diskussionen möchte ich mich besonders herzlich bedanken. Für die Erstellung des Parxisgutachtens möchte ich Herrn Dr. Joachim Steinle von der BMW Group danken.

Mein Dank gilt ganz besonders meiner Familie, die mir mit viel Geduld und Verständnis die Zeit und den Freiraum gegeben hat, diese Arbeit anzufertigen.

Dresden, August 2006

Kurzfassung

Die Verbesserung der Verkehrssicherheit ist eine zentrale politische und gesellschaftliche Aufgabe. Sicherheitsfördernde Entwicklungen auf den Gebieten der Kraftfahrzeugtechnik und des Straßenbaus führten zu einem Rückgang der Unfallschwere, trotz eines starken Anstieges der Verkehrsleistung. Seit dem Jahr 1972 ist ein stetiger Rückgang der Anzahl von getöteten Personen im Straßenverkehr zu beobachten.

Das Ziel der vorliegenden Forschungsarbeit bestand darin, ein Fahrerassistenzsystem zu entwickeln, welches den Fahrer im Bereich von Außerortsstraßen bei der Wahl seiner Geschwindigkeit unterstützt. Das System soll den Fahrer vor kritischen Stellen (abrupte Geschwindigkeitsänderungen) warnen. Die Informationen dazu werden aus digitalen Karten entnommen. Eine interdisziplinäre Zusammenarbeit bildet die Grundlage dieser Arbeit. Der Fahrer erhält vom entwickelten Fahrerassistenzsystem Speed Control (SC) eine Empfehlung bezüglich der gesetzlich zulässigen und der von der Streckencharakteristik abhängigen Geschwindigkeit. Die Hauptanwendung dieses Assistenzsystems liegt im Bereich unstetiger einbahnig zweistreifiger Außerortsstraßen. Auf diesen Straßen werden einerseits geringe Fahrkilometer zurückgelegt und andererseits passieren auf diesen Straßen die meisten Unfälle mit schwerem Personenschaden auf Grund falsch gewählter Geschwindigkeiten. Zur Umsetzung im Fahrerassistenzsystem Speed Control wurden eigene Geschwindigkeitsmodelle für die unterschiedlichen Fahrstilwünsche entwickelt. Grundlage dafür waren umfangreiche Messungen. Es wurde festgestellt, dass in Abhängigkeit vom Fahrstilwunsch unterschiedliche Geometrieparameter einen Einfluss auf die Geschwindigkeit besitzen. Störgrößen aus der Witterung (Regen) und der Tageszeit (Nachtfahrten) haben ebenfalls einen Einfluss auf die Geschwindigkeitswahl. Dieser Einfluss wurde in den Gesamtalgorithmus integriert. Für die Umsetzung der berechneten Geschwindigkeiten im Fahrzeug wurden Untersuchungen zum Beschleunigungsverhalten von Kraftfahrern durchgeführt. Aus diesen Untersuchungen wurde ein Algorithmus entwickelt, mit dem in Abhängigkeit von streckencharakteristischen Parametern und dem Fahrstilwunsch eine Längsbeschleunigung berechnet wird. Dieses Modell wurde für die Ermittlung des Empfehlungszeitpunktes verwendet. Für eine sichere Ermittlung der Streckencharakteristik sind digitale Karten notwendig, in denen der Verlauf einer Strecke durch eine ausreichend hohe Punktdichte abgebildet wird. Derzeit gebräuchliche Navigationskarten eignen sich dazu nicht. Für die Geometrieerfassung wurden prototypisch digitale Karten mit hoher Informationsdichte erstellt, die eine ausreichend genaue Abschätzung der Lageplangeometrie ermöglichen. Das Fahrerassistenzsystem Speed Control wurde in einem Demonstratorfahrzeug umgesetzt. Mit Hilfe von Probandenfahrten erfolgte eine erste Beurteilung des Systems. Die ermittelten Geschwindigkeits- und Beschleunigungsmodelle wurden im Wesentlichen bestätigt. Bei den Fahrten wurde festgestellt, dass die Bewertung und Akzeptanz eines solchen Systems von Persönlichkeitsmerkmalen der Fahrer abhängt. Dieses ist besonders für Menschen, die den sportlichen Fahrstil bevorzugen und zudem eine ausgeglichene, anpassungsbereite Persönlichkeitsstruktur aufweisen, geeignet. Der Empfehlungsmodus, der dem Prinzip des „Aktiven Operators“ (Fahrer und Fahrzeug wirken zusammen) am nächsten kommt, scheint sich als die bessere Variante zu erweisen.

Inhaltsverzeichnis

1	Problemstellung	1
2	System Fahrer - Fahrzeug - Straße	4
2.1	Die Straße	6
2.2	Das Fahrzeug	6
2.3	Der Fahrer	7
3	Fahrerassistenzsysteme	9
3.1	Klassifizierung von Fahrerassistenzsystemen	9
3.2	Anforderungen an Fahrerassistenzsysteme	11
3.3	Fahrertypisierung	13
3.4	Anpassung von Assistenzsystemen	14
3.5	Beschreibung ausgewählter Fahrerassistenzsysteme auf der Führungs- ebene	15
3.5.1	Der Tempomat / ACC	15
3.5.2	NavSpeed	16
3.5.3	Speed Control System	18
3.5.3.1	Die Digitale Karte als Grundlage	18
3.5.3.2	SC auf der Grundlage von der vorhandenen Griffbarkeit	21
3.5.3.3	SC auf der Grundlage der Querschleunigung	21
3.5.3.4	SC auf der Grundlage von Fahrverhaltensuntersuchungen	23
3.6	Zusammenfassung	26
4	Fahrverhalten	28
4.1	Externe Einflüsse auf das Geschwindigkeitsverhalten	28
4.1.1	Kurvigkeit	28
4.1.2	Lageplankurve	29
4.1.3	Fahrbahnbreite	33
4.1.4	Dunkelheit und Regen / Nassen	33
4.1.5	Sichtweite	35
4.2	Externe Einflüsse auf das Beschleunigungsverhalten	36
4.2.1	Längsbeschleunigungsverhalten	36
4.2.2	Querschleunigungsverhalten	38
4.3	Zusammenfassung	40
5	Ziele der eigenen Untersuchung und Methodik	42
5.1	Ziele der eigenen Untersuchung	42
5.2	Untersuchungsablauf	43
5.3	Datenaufnahme	44
5.3.1	Auswahl und Aufnahme von Messstrecken	44
5.3.2	Erfassung des Fahrverhaltens	46

5.3.2.1	Verfolgungsfahrten	46
5.3.2.2	Querschnittsmessungen	48
5.4	Methoden der Datenauswertung	49
5.4.1	Fahrertypisierung aus Einzelprofilen	49
5.4.2	Auswertung der Geschwindigkeitsmessungen - Verfolgungsfahrten . .	53
5.4.3	Auswertung der Geschwindigkeitsmessungen - Querschnittsmessungen	56
5.5	Zusammenfassung	57
6	Darstellung und Interpretation der Ergebnisse	58
6.1	Fahrertypisierung	58
6.2	Auswertung der Geschwindigkeitsmessungen	61
6.2.1	Ergebnisse für Abschnitte ähnlicher Streckencharakteristik	61
6.2.1.1	Einfluss der Kurvigkeit	61
6.2.1.2	Einfluss der Fahrbahnbreite	62
6.2.1.3	Ergebnisse über den Einfluss der Umgebungsbedingungen	64
6.2.2	Ergebnisse für Singularitäten	65
6.2.2.1	Einfluss des Radius ohne Berücksichtigung weiterer Parameter	65
6.2.2.2	Einfluss des Richtungsänderungswinkels im Bezug zum Radius	68
6.2.2.3	Einfluss der vorgelagerten Streckengeometrie im Bezug zum Radius .	70
6.2.2.4	Einfluss der Fahrbahnbreite im Bezug zum Radius	73
6.2.2.5	Einfluss der Umgebungsbedingungen im Bezug zum Radius	74
6.2.3	Schlussfolgerungen für die Geschwindigkeitsprognose	76
6.2.4	Geschwindigkeitsprognosemodell	78
6.3	Auswertung der Quer- und Längsbeschleunigungen	81
6.3.1	Auswertung der Querbeschleunigungen	81
6.3.2	Auswertung der Längsverzögerungen	82
6.3.2.1	Einfluss der Geschwindigkeitsdifferenz	84
6.3.2.2	Einfluss der Ausgangsgeschwindigkeit	88
6.3.2.3	Einfluss der Kurvengeometrie	90
6.3.3	Schlussfolgerungen für die Beschleunigungsprognose	92
6.3.4	Längsverzögerungsmodell	92
6.4	Zusammenfassung	94
7	Umsetzung und Validierung des SC - Systems	96
7.1	Erweiterung der feindigitalen Karte	98
7.2	Entwicklung der SC - Software	101
7.2.1	Bestimmung der Lageplanelemente	102
7.2.2	Bildung von Abschnitten	105
7.2.3	Geschwindigkeitsprognose	106
7.2.4	Vorausschau	106
7.3	Probandenfahrten	107
7.3.1	Zielstellungen	107

7.3.2	Versuchsdesign	109
7.3.3	Ergebnisse	111
7.3.4	Zusammenfassung	116
8	Zusammenfassung und Ausblick	117
9	Anlagen	134

1 Problemstellung

Das vorhandene deutsche Straßennetz ist über Jahrzehnte stetig gewachsen und somit das Abbild der historischen Entwicklung, die in ihrem Verlauf von unterschiedlichen Anforderungen geprägt war. Heute ist das Straßennetz ein bedeutender Bestandteil einer modernen und leistungsfähigen Infrastruktur. Diese wiederum stellt eine Voraussetzung für eine positive wirtschaftliche Entwicklung dar. Seit den fünfziger Jahren ist ein deutlicher Anstieg des Kraftfahrzeugverkehrs zu verzeichnen. Auf diese Entwicklung reagierten die Baulastträger mit Um-, Aus- und Neubaumaßnahmen vor allem im Bereich der Bundesfernstraßen (Bundautobahnen und Bundesstraßen). Auf diesen Bundesfernstraßen werden 52% des gesamten Verkehrsaufkommens abgewickelt, obwohl diese Verkehrswege nur einen Anteil von 9% des gesamten deutschen Straßennetzes darstellen (Abb. 1).

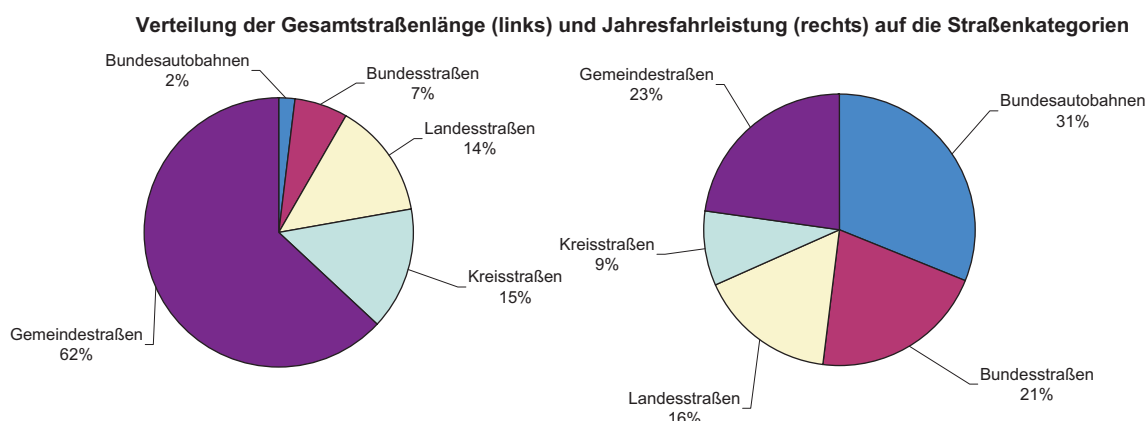


Abb. 1: Verteilung der Straßenlängen und Jahresfahrleistung auf die Straßenkategorien
Quelle: ELSNER 2003

Im Straßenverkehr verloren und verlieren viele Menschen ihr Leben. Aus diesem Grund wurden und werden sicherheitsfördernde Maßnahmen auf vielen Gebieten (z.B. Gurtpflicht, Alkoholverbot, Fahrzeugtechnik, Verkehrserziehung, moderne Trassierungen, passive Schutzeinrichtungen, verbesserte Griffigkeit etc.) durchgeführt. Seit vielen Jahren ist die Verkehrssicherheit ein wesentlicher Bestandteil der Forschung. Krebs / Klöckner (1977), Hiersche u.a. (1984), Leutzbach / Zoellmer (1984) etc. stellten z. B. fest, dass der Fahrtenfall der häufigste Unfalltyp auf Außerortsstraßen ist. Solche Unfälle sind sogenannte „Alleinunfälle“ bei denen es keinen Einfluss anderer Verkehrsteilnehmer gibt. Die Ursachen für diese Unfälle liegen auch in der Gestaltung der Straßenverkehrsanlagen und deren Linienführung. In den letzten Jahren wurden deshalb wissenschaftliche Verfahren zur Bewertung vorhandener und zu planender Linienführungen im Hinblick auf die Verkehrssicherheit entwickelt (z. B. Appelt 1998, Bakaba 2000, Engelke 1990, Sosouhmien 2001, Lippold u.a. 2002, Lippold u.a. 2003 etc.). Die Abbildung 2 verdeutlicht die Verteilung der Anzahl der getöteten Verkehrsteilnehmer auf die Straßenklassen im Jahr 2002.



Abb. 2: Verteilung der Getöteten auf die Straßenklassen Quelle: ELSNER 2003

Aus dieser ist abzuleiten, dass obwohl auf Bundesautobahnen 1/3 der Fahrleistungen abgewickelt werden, nur 12% der getöteten Personen zu beobachten sind. Dies lässt sich damit erklären, dass sicherheitsfördernde Maßnahmen auf dem Gebieten der Straßenaustattung, des Straßenbaus und -entwurfs auf diesen Hochleistungsstraßen bereits angewendet werden. Zu diesen Maßnahmen zählen z. B.

- die Einführung der Relationstrassierung,
- die Einführung sicherer Querschnitte,
- die Ausbildung einheitlicher und sicherer Knotenpunkte
- die Gewährleistung einer Mindestgriffigkeit und
- die Anordnung von passiven Schutzeinrichtungen.

Die regionalen Straßennetze, die u. a. aus Landes-, Kreis- und Gemeindestraßen bestehen, entsprechen dagegen häufig nicht den aktuellen Sicherheitsstandards und sind auf Grund ihrer historisch entstandenen Linienführung nicht regelkonform. Diese Aussage trifft auch auf einen Großteil der Bundesstraßen in den neuen Bundesländern zu.

Die Automobilindustrie entwickelte und entwickelt Systeme, welche die passive Sicherheit erhöhen. Gedacht sei dabei an Systeme, welche

- die Unfallschwere deutlich reduzieren (z. B. Airbags, Gurtsstraffer),
- dem Fahrer bei der Stabilisierung des Fahrzeuges in kritischen Situationen helfen (ABS, ESP u. a.) und
- dem Fahrer bei der Planung seiner zu fahrenden Strecke unterstützten (z. B. Navigationssystem), um diesen zu entlasten.

Die Weiterentwicklung der beiden miteinander im Zusammenhang stehenden Komponenten Straße (Linienführung) und Kraftfahrzeug sowie administrative Entscheidungen (Alkoholverbot, Gurtpflicht etc.) haben dazu geführt, dass die Verkehrssicherheit in den letzten Jahren deutlich erhöht wurde. Das belegt die folgende Grafik, welche den Rückgang der Getöteten bei Verkehrsunfällen zeigt, obwohl die Anzahl der Unfälle angestiegen ist (Abb. 3).

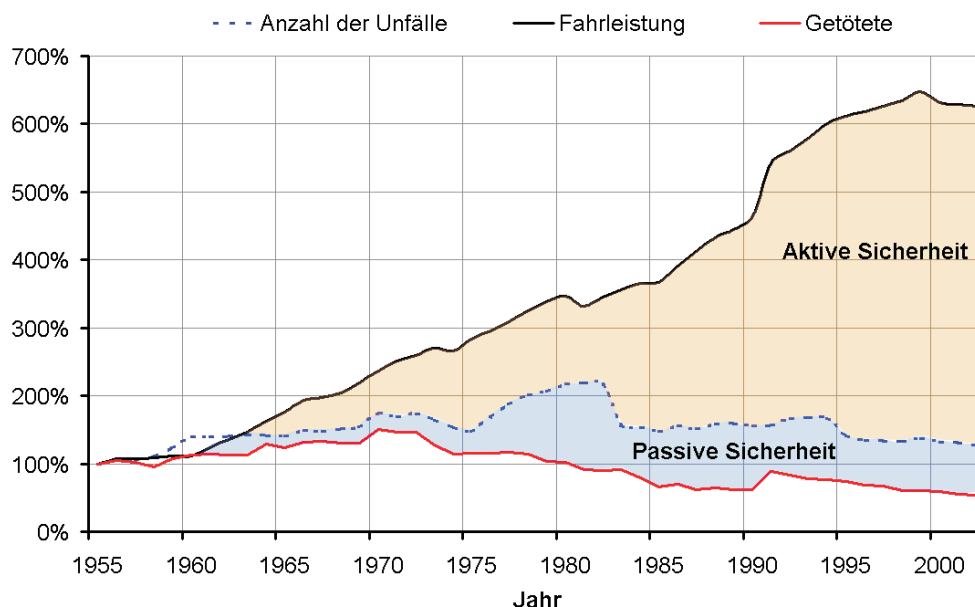


Abb. 3: Entwicklung der Verkehrssicherheit in Deutschland Ausgangswerte: 100% 1955: 12.800 Getötete; 386.000 Unfälle; 98,7 Mrd. km Fahrleistung

Der Ausbau des gesamten Straßennetzes auf einen einheitlichen Standard ist in den nächsten Jahrzehnten aus wirtschaftlichen Gründen unwahrscheinlich. Aus diesem Grund arbeitet die Forschung sowie die Automobilindustrie an Systemen, welche den Fahrer dabei unterstützen sollen, kritische Fahraufgaben sicher und komfortabel zu bewältigen. Diese, den Fahrer entlastende Systeme, werden Fahrerassistenzsysteme genannt. Zu diesen schon heute eingesetzten Systemen zählen z. B. das Anti-Blockier-System (ABS), das Navigationssystem und der Tempomat.

Das Ziel der vorliegenden Forschungsarbeit bestand darin, ein Fahrerassistenzsystem zu entwickeln, welches den Fahrer im Bereich von Außerortsstraßen bei der Wahl seiner Geschwindigkeit unterstützt. Das System soll den Fahrer vor kritischen Stellen (abrupte Geschwindigkeitsänderungen) warnen. Die Informationen dazu werden aus digitalen Karten entnommen. Eine interdisziplinäre Zusammenarbeit bildet die Grundlage dieser Arbeit. Forschungsarbeiten aus den Wissenschaftsfeldern Straßenentwurf/ -bau, Maschinenbau (Fahrzeugbau), Elektrotechnik, Informatik und Verkehrspsychologie werden zusammengeführt, vorgestellt und prototypisch an einem System umgesetzt.

2 System Fahrer - Fahrzeug - Straße

Der Prozess des Fahrens lässt sich durch einen kybernetischen Regelkreis beschreiben. In diesem werden die Ergebnisse eines Teilprozesses wieder als Eingangsgröße verwendet. Im Bereich des Straßenbaus werden häufig die Modelle nach Dilling 1973 bzw. Durth (1974) verwendet. Abb. 4 stellt das vereinfachte Blockschaltbild eines Regelkreises Fahrer - Fahrzeug - Straße nach Dilling (1973) dar.

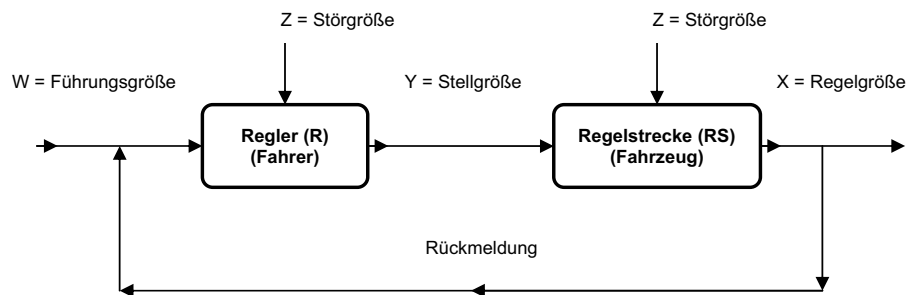


Abb. 4: Regelkreis Fahrer - Fahrzeug - Straße Dilling (1973)

Eine sichere Fahrt ist dann möglich, wenn sich die Komponenten:

- Fahrer (Regler, R),
- Fahrzeug (Regelstrecke, RS) und
- Straße / Umfeld (Führungsgrößen, W)

in einem ausgeglichenen Zustand befinden. Die Komponenten können nicht einzeln betrachtet werden. Regelgröße des Systems ist die Fahrweise. Als Stellgrößen sind die Längsregelung in Form von Bremsen und Beschleunigen und die Querregelung (Lenken) vorhanden. Auf der Grundlage der, dem Fahrer zur Verfügung stehenden, Informationen über den vorausliegenden Streckenabschnitt muss dieser die Teilgrößen (Geschwindigkeit, Beschleunigung, Spurlage etc.) wählen. Durch das Fahrzeug (Regelstrecke) erhält er Rückmeldungen. Stimmt die Erwartungshaltung des Fahrzeugführers nicht mehr mit der aktuellen Situation überein (z. B. zu hohe Querbeschleunigung oder ein Hindernis auf der Fahrbahn), muss eine Korrektur erfolgen. Unter den genannten Systemkomponenten (Fahrer, Fahrzeug und Straße) besitzt der Fahrer als Regler die größte Bedeutung. Ein solches Modell kann als geordnete Klassifikation von Einflussgrößen auf das Regelungsverhalten bezeichnet werden, eine Parametrisierung ist nicht möglich.

Aus diesem Grund erfolgten weitere ingenieurpsychologische Modellierungen zur Beschreibung des Gesamtsystems. Hier ist das Drei - Ebenen - Modell nach Donges 1978 zu nennen. Die Parameter dieses Modells sind physikalische Größen. Die vorhandene Spurlage wird z. B. mit einer Sollspurlage verglichen. Bei diesem Modell ist nicht definiert, welche Prozesse den Fahrer bei der Wahl seiner Führungsgrößen leiten.

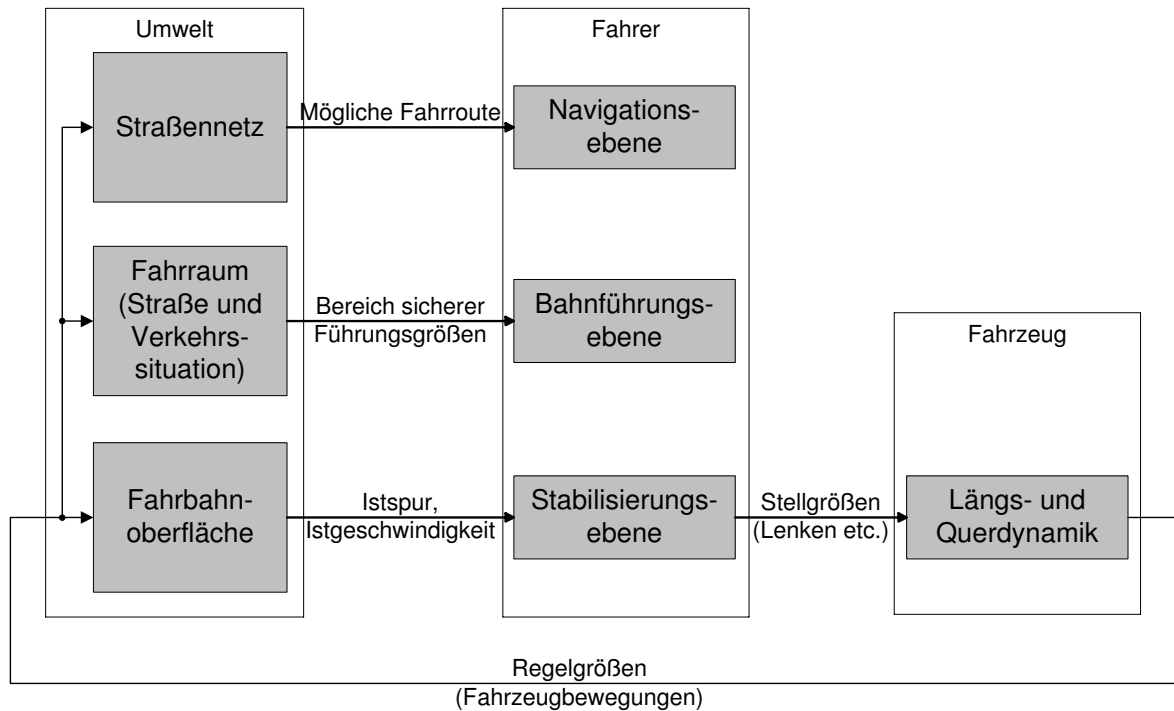


Abb. 5: Drei - Ebenen - Modell der Fahrzeugführung nach Donges (1978)

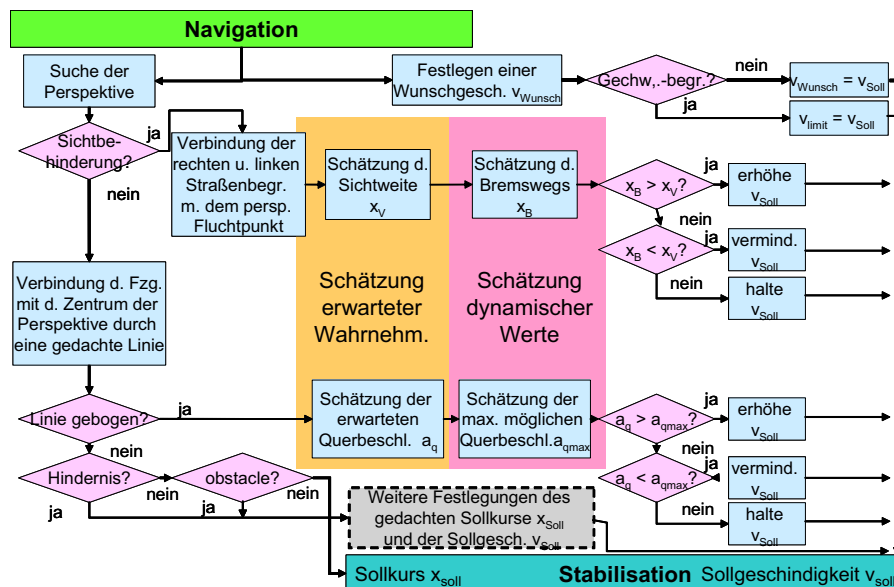


Abb. 6: Teilmodell des Regelkreises nach Bubb / Reichart (2005)

Dieses Problem greifen kognitionspsychologische Modelle auf. Ihr Kennzeichen ist, dass sie die wahrnehmungspsychologischen Leistungen des Fahrers thematisieren und beschreiben. Sie modellieren die Führungsgrößen (Geschwindigkeit und Spurlage, Abb. 6) Bubb / Reichart (2005). Modelle dieser Art identifizieren die psychologischen Bestimmungsgrößen näher und geben konkrete Anhaltspunkte, welche Parameter empirisch bestimmt werden müssen. Derzeit existiert kein geschlossenes, parameterisierbares Modell mit dem das Komplexsystem Fahrer - Fahrzeug - Straße mathematisch beschrieben werden kann. Diese Modelle befinden sich erst in der Entwicklung und stehen in den nächsten Jahren noch nicht zu Verfügung.

2.1 Die Straße

Die Straße mit ihrer baulichen Gestalt, den zugeordneten Signalen und Verkehrszeichen ist die wichtigste Führungsgröße im Regelkreis bei der Wahl der Geschwindigkeit von unbehindert fahrenden Pkw auf einbahnig zweistreifigen Außerortsstraßen. Auf der Führungsgröße Straße bewegen sich die Komponenten Fahrer - Fahrzeug fort. Somit liefert die Straße ständig neue Führungsgrößen. Die Straße als Führungsgröße wird durch den Planer in den drei Ebenen (Lageplan, Höhenplan und Querschnitt) gestaltet. Die Geometrie einer vorhandenen Straßenverkehrsanlage hat einen wesentlichen Einfluss auf den Regelkreis und somit auf das Fahrverhalten und die Verkehrssicherheit. Die für den Fahrer sichtbare Straßengeometrie ist seine wichtigste Informationsquelle zur Wahl seiner Führungsgrößen (Längs- und Querregelung).

2.2 Das Fahrzeug

Das Fahrzeug ist die Schnittstelle zwischen Fahrer und Straße. Es übermittelt Informationen über den Zustand der Fahrbahn (Ebenheit) und zum derzeitigen Zustand der Fahrt (Quer- und Längsbeschleunigungen). Mit Hilfe des Steuersystems des Fahrzeuges (Quer- und Längsregelung) führt der Fahrer die Führungs- und Stabilisierungsaufgaben aus. Von der Automobil- und Fahrzeugindustrie wurden die Fahrzeuge in den letzten Jahren ständig weiter entwickelt und verbessert. Die Fahrwerke wurden z. B. so ausgelegt, dass Unebenheiten in der Fahrbahn nur stark gedämpft an den Fahrer weitergeleitet werden. Zu dieser Entwicklung führte bereits Angenendt u.a. (1987) aus:

„Ein technisch hochwertiges Fahrzeug mit perfektem Fahrwerk, Allradantrieb und guter Schallisolierung teilt dem Fahrer eventuell so wenig über seine Probleme beim Bewältigen von Fahrbahn und Geschwindigkeit mit, dass das schließliche Ausbrechen des Fahrzeuges für den Fahrer so überraschend kommt, dass es nur noch schwer oder auch nicht mehr kompensiert werden kann“ .

Um dies zu verhindern, müssen Systeme für den Fahrer transparent und verständlich sein. Dies gilt besonders für Systeme, die den Fahrer bei seiner Führungsaufgabe unterstützen. Aus diesem Grund müssen moderne Assistenzsysteme auf die Bedürfnisse und Fähigkeiten

des Fahrers abgestimmt werden.

2.3 Der Fahrer

In den Regelkreis Fahrer-Fahrzeug-Straße (Kap. 2) ist der Mensch als Regler integriert. Er muss die Stellgrößen (Längs- und Querführung) ständig den Gegebenheiten anpassen. Zur Erledigung der Fahraufgaben nimmt der Fahrer über die Sinnesorgane den Fahrraum wahr. Der größte Teil der Informationen (>90 %) wird visuell aufgenommen. Den Rest der erhält er durch die greifenden Hände am Lenkrad (Haptik), die Ohren (Akustik) sowie die über Muskeln und Gleichgewichtsorgane übermittelte Selbstbewegung des Körpers (Propriozeptorik). In der Verkehrspsychologie ist häufig das „Drei Ebenen Modell“ (Alexander / Lunefeld 1984, Bernotat 1970, Donges 1978 etc.) zu finden. Danach lässt sich die Fahraufgabe in folgende Ebenen (Abb. 5) gliedern:

- **Navigation**

Vor Antritt der Fahrt bestimmt der Fahrer mit Hilfe seiner Ortskenntnis, anhand von Papierlandkarten etc. die schnellste oder kürzeste Fahrtstrecke zu seinem Ziel. Die gefahrene Route gleicht er ständig mit den tatsächlichen Gegebenheiten ab.

- **Wahl der Führungsgrößen / Bahnführung**

Die Bahnführung wird üblicherweise in Quer- und Längsregelung unterschieden. Ziel der Querführung ist, dem Straßenverlauf zu folgen. Der gewünschte Fahrstreifen wird festgelegt und eingeregelt.

Ziel der Längsführung ist die Wahl der Geschwindigkeit und Beschleunigung.

Für die Wahl der Führungsgrößen (quer und längs) nimmt der Fahrer mit Hilfe seiner Sinnesorgane Informationen über den vorausliegenden Fahrraum auf. Er projiziert in den vorausliegenden Fahrraum eine virtuelle Sollspur. Diese setzt er dann auf Grundlage seiner Erfahrung in Regelungsgrößen um.

- **Stabilisierung des Fahrzeuges**

Die Stabilisierung des Fahrzeuges in normalen Fahrsituationen ist mit heutigen Fahrzeugen unproblematisch. Sind die fahrdynamischen Grenzen aber einmal überschritten, steht der Fahrer meist vor einer schwierigen Aufgabe. Er muss schnell und richtig reagieren, um das Fahrzeug wieder zu stabilisieren.

Reichart / Haller (1995) führten aus, dass sich die drei Ebenen im Hinblick auf die zeitlichen Randbedingungen unterscheiden. Die kognitive Zuwendung ist ebenfalls verschieden (Abb. 7). Während für die Aufgabe der zu planenden Strecke die kognitiven Aufgaben als hoch einzustufen sind (Suchen des Zielortes auf der Landkarte und Festlegung der besten Route), ist bei der Stabilisierung eine ständige Tätigkeit des Kraftfahrers notwendig.

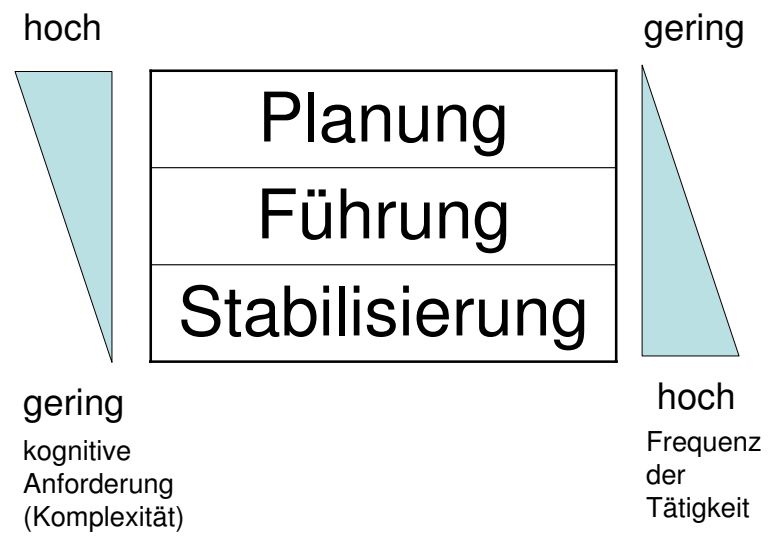


Abb. 7: Einteilung der Fahraufgaben in drei Ebenen mit korrespondierenden zeitlichen Randbedingungen und kognitiven Anforderungen nach Reichart / Haller (1995)

3 Fahrerassistenzsysteme

3.1 Klassifizierung von Fahrerassistenzsystemen

Moderne Fahrerassistenzsysteme unterstützen den Fahrer bei seinen Aufgaben, die aus Planen, Führen und Stabilisieren bestehen (siehe Kap. 2.3). Entsprechend lassen sich die vorhandenen Systeme ebenfalls in drei Kategorien gliedern:

- **Systeme auf der Planungsebene**

Systeme auf der Planungsebene sind mittlerweile bei vielen Automobilherstellern etabliert. Navigations- bzw. Zielführungssysteme planen die Fahrtroute vom Standort zum gewünschten Zielort und geben dem Fahrer während der Fahrt Hinweise auf Abbiegestellen. Weicht der Fahrer von der vorgeschlagenen Route ab, errechnen diese Systeme automatisch eine neue Route. Bei der Planung der Fahrtstrecke können auch eingegangene Staumeldungen von Radiodiensten (z. B. RDS-TMC) berücksichtigt werden, ohne dass eine Aktion des Fahrers nötig ist. Durch diese Wirkungsweise erhöhen Navigationssysteme den Komfort und die Sicherheit (Kopf / Hermann 1997).

- **Systeme auf der Führungsebene**

Assistenzsysteme auf der Führungsebene wurden erst vor kurzem in den Markt eingeführt. Ein Tempomat (Cruise Control, CC) zum Beispiel entlastet den Fahrer, indem er eine eingestellte Wunschgeschwindigkeit regelt. Auf verkehrsreichen Strecken ist dieses System meist nicht mehr kontinuierlich nutzbar, da der Fahrer auf Grund langsamerer Verkehrsteilnehmer oft eingreifen muss. Das Adaptive Cruise Control (ACC) ist als Erweiterung des Tempomaten zu sehen. Neben der Regelung der Wunschgeschwindigkeit übernimmt das System auch die Einhaltung eines konstanten Abstandes zum vorausfahrenden Fahrzeug. Ist die Strecke wieder frei, beschleunigt ACC wieder auf die zuvor eingestellte Wunschgeschwindigkeit (Prestl u.a. 2000). Das Heading Control (HC) als ein weiteres System befindet sich derzeit in der Entwicklung. Es soll den Fahrer bei der Spurführung unterstützen. Nähert sich das Fahrzeug dem Rand des eigenen Fahrstreifens, kann durch verschiedene Rückmeldestrategien (z. B. Gegenmoment am Lenkrad) der Fahrer gewarnt werden (König u.a. 2000).

- **Systeme auf der Stabilisierungsebene**

Assistenzsysteme auf dieser Ebene reagieren in der Regel schneller als ein normaler Fahrer. Solche Systeme werden seit einiger Zeit in viele Serienfahrzeuge integriert. Das Anti-Blockier-System (ABS) verhindert das Blockieren der Räder bei starken Bremsvorgängen, während die Anti-Schlupf-Regelung (ASC) das Durchdrehen der Räder bei starken Beschleunigungen unterbindet.

Eine Übersicht über die Zuordnung der Fahrerassistenzsysteme zu den drei Ebenen ist der Tab. 1 zu entnehmen.

Planungsebene	
Navigationssystem	Navigations- bzw. Zielführungssysteme planen die Fahrtroute vom Standort zum gewünschten Zielort
Führungsebene	
CC	Tempomat Cruise Control, regelt eine eingestellte Wunschgeschwindigkeit ein
ACC	Einhaltung eines konstanten Abstandes vom Vordermann
HC	Unterstützung des Fahrers bei der Spurhaltung
TLC	Time to Line Crossing Spurverlassenswarnung
SC	Speed Control Unterstützung bei der Wahl der Geschwindigkeit auf Außerortsstraßen
NavSpeed	Anzeige bzw. Einregelung der gesetzlich zulässigen Höchstgeschwindigkeit
Stabilisierungsebene	
ABS	Anti-Blockier-System verhindert das Blockieren der Räder bei einer Notbremsung
ESP	Stabilisiert das Fahrzeug beim Durchfahren einer Kurve
DBC	Dynamic Brake Control unterstützt den Fahrer bei einer Notbremsung

Tab. 1: Ausgewählte Fahrerassistenzsysteme und Zuordnung zu den Ebenen der Fahraufgabe

Eine optimale Fahrerassistenz besteht nicht darin, möglichst viele Aufgaben durch weitgehend automatische Systeme vom Fahrer wegzunehmen (König u.a. 2002). Dies würde neben einem mit der Dauer der Automatik - Benutzung zunehmenden „Übungsverlust“ auch die Aufmerksamkeit des Fahrers reduzieren. Eine mögliche Folge könnte dann sein, dass bei einer Fehlfunktion des Assistenzsystems der Fahrer nicht schnell genug oder falsch reagiert. Deshalb sind an ein Assistenzsystem verschiedene Anforderungen zu stellen. Diese werden in den nachfolgenden Absätzen beschrieben.

3.2 Anforderungen an Fahrerassistenzsysteme

Ziel der Fahrerassistenz nach Reichart / Haller (1995) ist es, den Fahrer nach dessen Regeln und Erwartungen bei der Erfüllung seiner Aufgaben zu unterstützen, ohne ihn zusätzlich zu belasten oder in seiner Entscheidungsfreiheit einzuschränken. Gut konzipiert ist folglich ein Assistenzsystem, das dem Fahrer stets auf dem optimalen Anforderungspegel hält. Wesentliche Elemente dieses Ansatzes sind:

- die Erfassung der Fahrumgebung,
- die Bewertung der Fahrsituation,
- die modellgestützte Bestimmung eines Sollverhaltens des Fahrzeuges und
- der Vergleich mit den vom Fahrer tatsächlich eingeleiteten Fahrmanövern,

um daraus eine stets übersteurbare Unterstützung abzuleiten. Der Fahrer muss jederzeit die Situation, den Systemzustand und mögliche Reaktionen des Assistenzsystems abschätzen können. Dies bedeutet, dass das Systemverhalten immer transparent sein muss. In Abb. 8 ist dieses Konzept dargestellt. Der Abbildung ist zu entnehmen, dass die Aktionsunterstützung eine Funktion bereits eingeleiteter bzw. erwarteter Fahreraktionen ist. Aus diesem Grund darf, wenn der Fahrer eine Situation bereits erkannt hat (z. B. notwendige Änderung der Geschwindigkeit), das Assistenzsystem keine Information an den Fahrer weiterleiten.

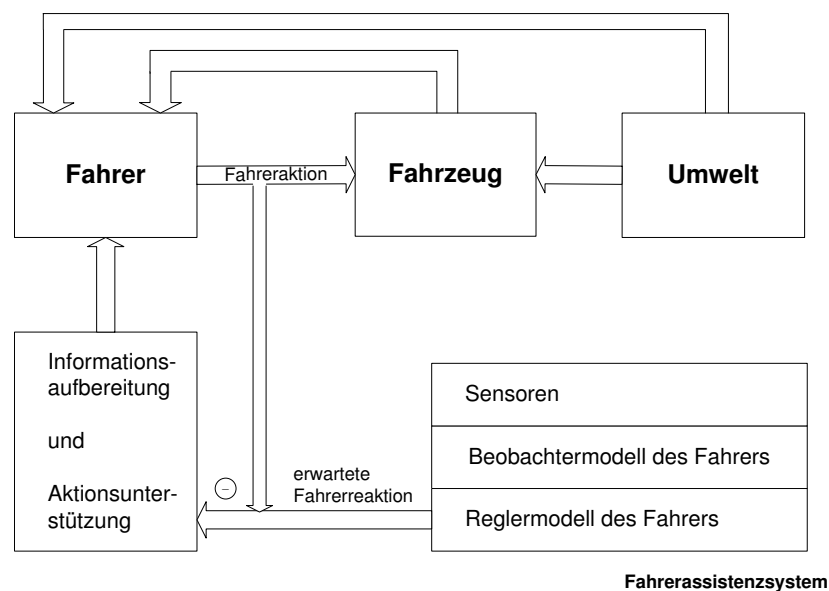


Abb. 8: Grundkonzept der Fahrerassistenz nach Reichart / Haller (1995)

Wie in Kap. 2.3 und 3.1 beschrieben, kann eine Unterstützung auf drei verschiedenen

Ebenen geleistet werden. Welche die jeweils Beste ist, hängt vom Fahrer ab. Assistenzsysteme auf der Stabilisierungsebene unterstützen vor allem ungeübte Fahrer und ältere Fahrer auf Grund ihrer geringeren Regelkompetenz. In Abhängigkeit von der momentanen Situation wünschen sich der Fahrer unterschiedliche Auslegungen eines Assistenzsystems. Um diese Anforderungen zu erforschen und zu definieren, wurde u. a. das Projekt **S**ituation-**A**ngepasste und **N**utzer-**T**yp-zentrierte **O**ptimierung von **S**ystemen zur Fahrerunterstützung (S.A.N.T.O.S ¹) durchgeführt. Projektziel war die Erhöhung der aktiven Sicherheit durch eine situationsangepasste und nutzertyporientierte Gestaltung der Assistenz im System Fahrer - Fahrzeug - Straße. An dem Projekt waren neben der BMW Group und der Robert Bosch GmbH sechs Institute verschiedener Hochschulen beteiligt. Den unterschiedlichen Anforderungen an die Assistenzsysteme wurde wie folgt Rechnung getragen:

- Zur Berücksichtigung der verschiedenen Nutzertypen wurde in Fahrstile unterschieden. Der Fahrer kann zwischen den Typen **sportlich**, **normal** und **entspannt** wählen. Der gewählte Fahrstilwunsch beeinflusst alle Assistenzsysteme auf der Führungsebene.
- Je nach der momentanen Verfassung kann ein Fahrer zwischen den Unterstützungsformen **Warnung**, **Empfehlung** und **Regelung** wählen.
- Assistenzsysteme sollen sich adaptiv an die Umgebungsbedingungen anpassen. Für die Witterung haben sich die Parameterwerte „Trocken / Nass / Glatt“ und für die Sichtbedingungen die Zustände „Keine Sichtbehinderung / Regensichtbehinderung“ als ausreichend und praktisch erwiesen.

Im Rahmen des S.A.N.T.O.S Projektes wurden die System ACC, HC und SC betrachtet. Die gesetzten Parameter Fahrstil, Unterstützungsform und Umgebungsbedingungen wirken sich auf die Strategie und das Verhalten jedes betrachteten Assistenzsystems auf der Führungsebene aus (vgl. hierzu Bubb u.a. 2002, Winner / Fecher 2002, Landau / Weiße 2002, Weise u.a. 2001a etc.).

Um die technischen Entwicklungen der Fahrerassistenzsysteme auf ein notwendiges Maß zu beschränken, sind weiterhin folgende Anforderungen an ein Fahrerassistenzsystem nach Niggstich (2002) zu stellen (Auszug):

- Die weitere Einführung technischer Systeme, die geeignet sind, die Verkehrssicherheit zu fördern, darf nicht die Verantwortlichkeit des Fahrers für den Betrieb seines Fahrzeuges einschränken.
- In Situationen jedoch, in denen die Fahraufgabe nicht ausreichend bewältigt werden kann, können technische Systeme diese Aufgabe übernehmen. Dies gilt auch für Systeme, welche vom Fahrer nicht übersteuert werden können.

¹Das Projekt wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Forschung und Technologie unter dem Förderkennzeichen 19S9826A/B gefördert.

- Wo die Fahraufgabe bewältigt werden kann, sind Eingriffe in Fahrzeugsysteme gegen den Willen des Fahrers abzulehnen.
- Einrichtungen in Kraftfahrzeugen, die der Fahrerassistenz dienen und sicherheitsrelevante Bauteile beeinflussen können, sollen einer technischen Überprüfung zugänglich sein.

Diese Grundsätze werden in der Literatur auch als „nationaler Konsens“ zwischen der Automobilindustrie und der Bundesregierung Deutschland betrachtet.

3.3 Fahrertypisierung

Fahrertypen können nach verschiedenen Kriterien und Verfahren bestimmt werden. Winner / Fecher (2002) und Landau / Weiße (2002) definierten im Rahmen des Projektes S.A.N.T.O.S fünf Fahrertypen:

1. „Sportlich - draufgängerisch“
2. „Dynamisch - progressiv“
3. „Routiniert - abgeklärt“
4. „Unauffällig - konservativ“ und
5. „Ängstlich - zurückhaltend“.

Der Fahrertyp wurde über einen Persönlichkeitsfragebogen und durch die subjektive Einschätzung des Versuchsleiters ermittelt. Fahrdynamisch messbare Größen (z. B. gemessene Geschwindigkeiten) bleiben unberücksichtigt. Bei Bubb u.a. (2002) erfolgte die Fahrertypbestimmung von Probanden durch einen Selbstbeurteilungsfragebogen nach Assmann (1985). Die Fahrertypen wurden von 1 (gelassen) bis 6 (dynamisch) definiert. Die Einstufung in fünf oder sechs Fahrertypen ist nach König u.a. 2000 mit Unzulänglichkeiten behaftet. Eine Unterscheidung in die Fahrertypen:

- „sportlich“,
- „normal“ und
- „entspannt“

zur Beeinflussung der Eigenschaften von Fahrerassistenzsystemen ist ausreichend.

Bei Marstaller u.a. (2001) wurde versucht, einen Zusammenhang zwischen der Fahrertypisierung mit Hilfe eines Selbstbeurteilungsfragebogens nach Assmann (1985) und fahrdynamisch messbaren Größen herzustellen. Das Ergebnis ist in Abb. 9 dargestellt. Ersichtlich ist, dass tendenziell der Fahrertyp sportlich größere Längs- und Querschleunigungen akzeptiert.

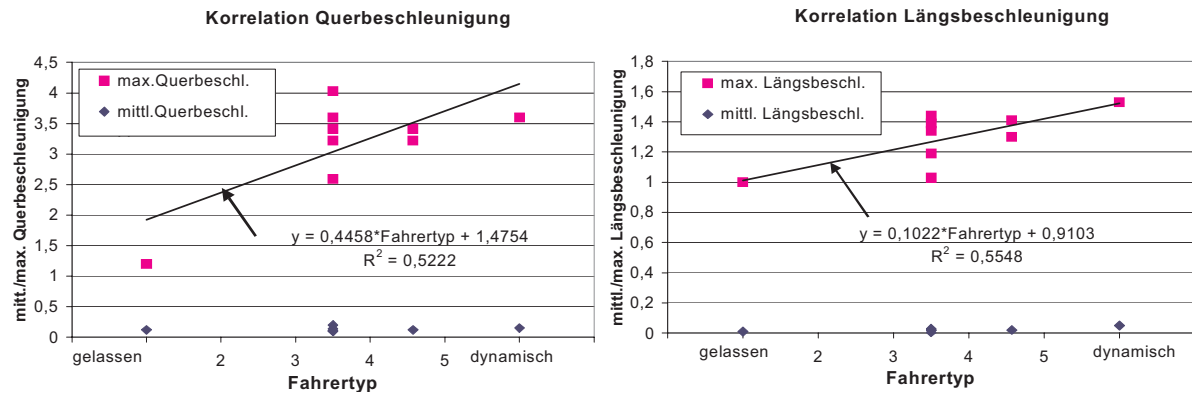


Abb. 9: Zusammenhang Fahrertyp nach Assmann (1985) und fahrdynamische Größen Marstaller u.a. (2001)

3.4 Anpassung von Assistenzsystemen

In Abhängigkeit von der Fahrsituation haben Fahrer unterschiedliche Anforderungen an eine Unterstützung. Auf der „gemütlichen Fahrt zum Badensee“ hat ein Fahrer sicher weniger Bedarf an Unterstützung als auf einer langen, eintönigen Fahrt (Ebersbach u.a. 2002 und Kap. 3.2). Im Rahmen des Projektes S.A.N.T.O.S wurden die Unterstützungsformen:

- „Hoch - Regeln“ ,
- „Mittel - Empfehlung“ und
- „Niedrig - Warnung“

als vom Fahrer akzeptanzfördernd identifiziert. Übertragen auf das Fahrerassistenzsystem SC (Kap. 3.5.3) bedeutet dies:

- „Warnung“ - das Assistenzsystem gibt eine Warnung an den Fahrer, wenn sich dieser einer kritischen Situation mit zu hoher Geschwindigkeit annähert.
- „Empfehlung“ - dem Fahrer wird ständig eine Geschwindigkeitsempfehlung gegeben. Die Warnfunktion bleibt aktiv.
- „Regelung“ - das Fahrzeug übernimmt die vom SC System empfohlene Geschwindigkeit als Regelgeschwindigkeit.

Die Funktionsweise von aktuellen Assistenzsystemen zur Unterstützung des Fahrers bei der Längsregelung wird in den folgenden Kapiteln beschrieben.

3.5 Beschreibung ausgewählter Fahrerassistenzsysteme auf der Führungsebene

3.5.1 Der Tempomat / ACC

Der Tempomat (oder Cruise Control CC) ist als Fahrerassistenzsystem seit längerer Zeit im Markt vorhanden. Dieses System regelt das Fahrzeug auf eine vom Fahrer eingestellte Wunschgeschwindigkeit ein. Befindet sich ein langsames Fahrzeug vor dem ACC Fahrzeug, so wird der Abstand zum Vorausfahrenden geregelt (Abb. 10, Prestl u.a. 2000). Dieses System unterstützt den Fahrer auf der Führungsebene. Über die Ausgestaltung

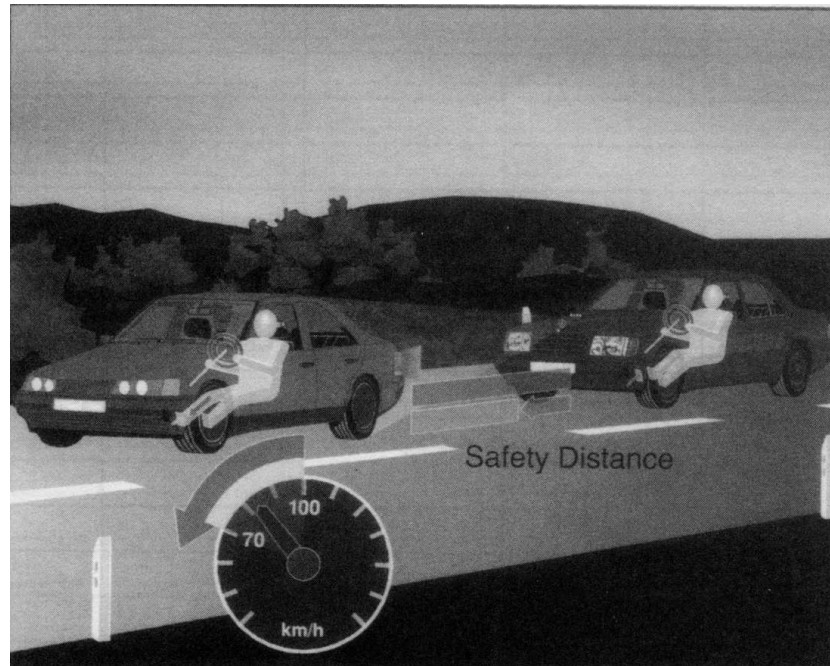


Abb. 10: Funktionsprinzip ACC System aus Chaloupka u.a. (1998)

des Systems existieren verschiedene Studien. Dabei kann prinzipiell in zwei Unterstützungsformen unterschieden werden:

- Durch haptische Rückmeldung am Gaspedal (Veränderung Druckpunkt) wird das Erreichen des eingestellten Sollabstandes oder der Wunschgeschwindigkeit dem Fahrer mitgeteilt („foot-on-gas“).
- Das System regelt die Geschwindigkeit selbständig ein, dies bedeutet, der Fahrer muss das Gaspedal nicht betätigen („foot-off-gas“).

Beide Systeme wurden in einer Untersuchung von Hogema u.a. (1997) und Chaloupka u.a. (1998) miteinander verglichen. Dabei wurden die Systeme mit automatischer Regelung („foot-off-gas“) besser bewertet. Aus diesem Grund werden die Systeme von den Fahrzeugherstellern (BMW, Mercedes etc.) als „foot-off-gas“ angeboten. Weinberger

(2001) stellte bei seinen Untersuchungen mit dem BMW - ACC fest, dass die Lernphase an ein solches System einen Zeitraum von ca. 2 Wochen in Anspruch nimmt. In der Studie gaben die Probanden einen Komfortgewinn durch den Einsatz des ACC an. Negative Auswirkungen auf die Fahrsicherheit konnten von ihm nicht festgestellt werden.

3.5.2 NavSpeed

Ein Navspeed informiert den Fahrer über die gesetzlich zulässige Geschwindigkeit. Diese Informationen können entweder aus digitalen Karten entnommen werden (Schraut 2000, Bachmann u.a. 2000) oder durch Funksignale an das Fahrzeug gesendet werden. Dies kann dadurch realisiert werden, dass an jedem geschwindigkeitsregelnden Verkehrszeichen ein Sender montiert wird. Dieser übermittelt die zulässige Geschwindigkeit an vorbei fahrende Fahrzeuge. Dieses System kann, ähnlich dem ACC System, entweder als Informa-

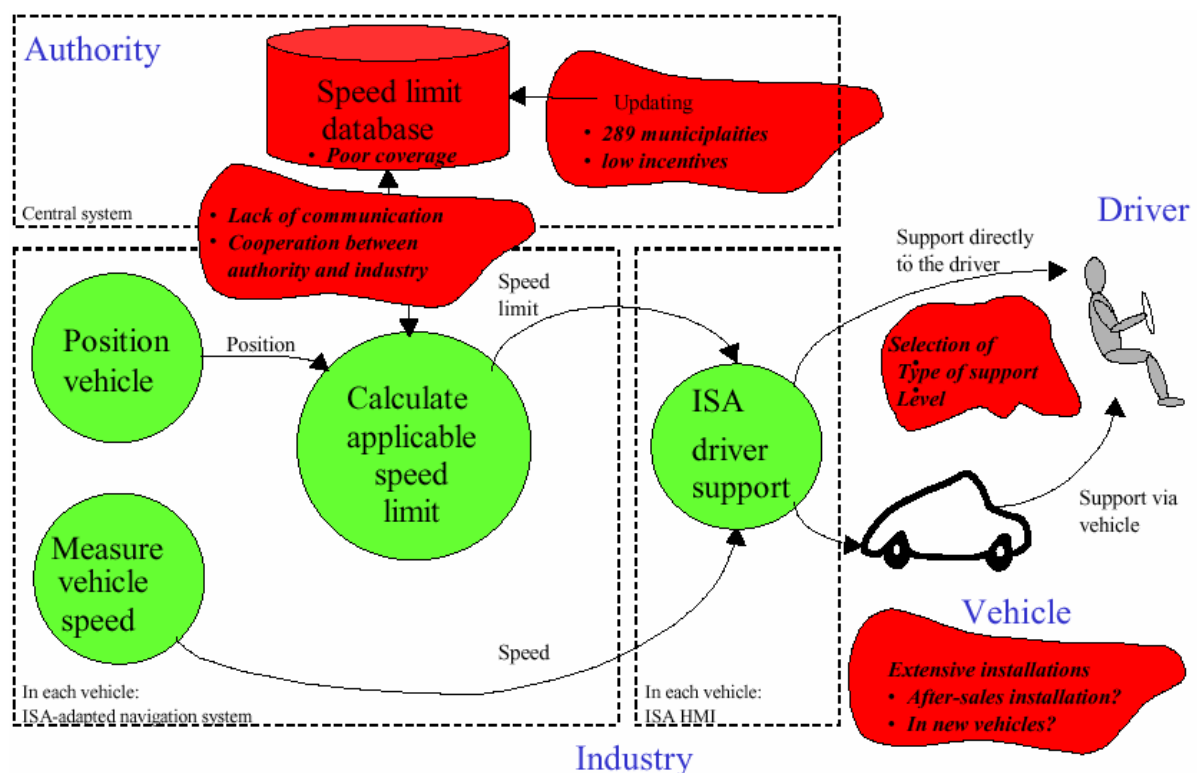


Abb. 11: Funktionsprinzip des ISA Systems Myhrberg (2003)

tionssystem (Aktives Gaspedal, Anzeige) oder als Regelsystem (Übergabe des Tempolimits als Wunschgeschwindigkeit an den Tempomaten) ausgelegt werden. Im Rahmen des Intelligent Speed Adaptation (ISA) Projektes wurde ein solches System entwickelt. In Abb. 11 ist das Funktionsprinzip des schwedischen ISA- Systems dargestellt. Die Roten Bereiche sind noch nicht vollständig umgesetzt. Das System wurde in verschiedenen Auslegungen, verschiedenen technischen Konzepten und verschiedenen Ländern getestet.

Teilweise wurde das System so ausgelegt, dass das Fahrzeug keine höhere Geschwindigkeit fährt, als die zulässige Geschwindigkeit (Duynstee u.a. 2001). Das System lässt sich nur über ein Not-Aus auf inaktiv schalten. Bei einem Feldversuch mit 120 Probanden in den Niederlanden wurde das System von einem Großteil der Fahrer akzeptiert und positiv beurteilt (Duynstee u.a. 2001). In Dänemark erfolgte ein Test im Zeitraum von 1998 bis 2001. Dabei wurde eine On Board Unit entwickelt und getestet (Abb. 12). Über das Display wird die zulässige Höchstgeschwindigkeit angezeigt. Überschreitet der Fahrer diese um mehr als 5 *km/h*, erfolgt der Warnhinweis durch eine Sprachausgabe: „Sie fahren zu schnell“ (Lahrman u.a. 2001). Bei Einsatz des Systems reduzierten die Probanden ihre Geschwindigkeit im Mittel um 5 bis 6 *km/h*.



Abb. 12: On Board Unit des Dänischen ISA Systems Lahrman u.a. (2001)

Schraut (2000) setzte ein Navspeed System auf Grundlage digitaler Karten um. Die zulässige Höchstgeschwindigkeit wurde dabei über einen vom Fahrer festgelegten Wert überschritten. Das System war als Regel- bzw. Warnsystem ausgelegt. Der Fahrer konnte dieses jedoch jederzeit übersteuern. Das System wurde in Testfahrten positiv beurteilt. Als eine wesentliche Voraussetzung wurde jedoch die variable Überschreitung der Tempolimits

genannt. Kohlhof (2001) führte Probandenfahrten mit einem Navspeed System durch, welches als Regelungssystem ausgelegt war. Um die Akzeptanz eines solchen Systems bei Fahrern zu erreichen, musste das System die zulässige Geschwindigkeit in Abhängigkeit vom Fahrstilwunsch um 5 bis 17% überschreiten (Kohlhof 2001).

3.5.3 Speed Control System

Ein Speed Control System unterstützt den Fahrer bei der Wahl der richtigen Geschwindigkeit in Kurven auf Außerortsstraßen. Bei Siobbel (2003) wird dieses System als eine Möglichkeit zur Erhöhung der Verkehrssicherheit genannt. In Japan wurde ein System getestet, bei dem der Fahrer akustisch über eine vorausliegende Kurve informiert wird („Achtung Kurve voraus“). Eine konkrete Geschwindigkeitsempfehlung erfolgte nicht. Bei einer Befragung gaben 38 % der Probanden an, dass dieses System ihrer Meinung nach die Sicherheit erhöht. Grundlage für dieses Fahrerassistenzsystem ist ebenfalls eine digitale Karte. In den folgenden Kapiteln werden der Aufbau einer digitalen Karte sowie verschiedene Ansätze zur Ermittlung der Geschwindigkeit vorgestellt.

3.5.3.1 Die Digitale Karte als Grundlage

Digitale Karten werden in der Automobilindustrie für Zielführungsaufgaben verwendet. Diese enthalten Informationen über Streckenlängen, Knotenpunkte und Straßentypen für die Ermittlung von Weglängen, Abbiegestellen und Fahrtzeiten. Als Grundelemente (Kernelement) werden Segmente definiert. Ein Segment besitzt Eigenschaften (z. B. Straßenklasse, Anzahl Fahrstreifen etc.) und besteht aus mindestens zwei Punkten (Anfangs- und Endpunkt, in der Datenbank als Nodes bezeichnet). Ein Segment beschreibt ein beliebig langes Straßenstück. Zwischen dem Anfangs- und Endpunkt können unterschiedlich viele geometriebeschreibende Punkte (Shapes) eingefügt werden. Diese Punkte besitzen als Attribut nur die geographische Lage. In Abb. 13 ist der prinzipielle Aufbau einer digitalen Karte dargestellt.

Für Deutschland steht die digitale Karte nahezu flächendeckend zur Verfügung. In Abb. 14 ist die Definition von drei Streckenabschnitten in der digitalen Karte ersichtlich. Jede der drei unterschiedlichen Farben stellt ein Segment dar. Die Shapes sind fortlaufend nummeriert. Die Nummerierungsrichtung darf sich innerhalb eines Segments nicht ändern. Zwei aufeinander folgende Segmente (Segment 1 und 3 der Abb. 14) können jedoch in unterschiedlicher Richtung definiert sein. In der digitalen Karte für die Navigation erfolgt die Nummerierung der Shapes mit einem Inkrement von 10. Im Kreuzungsbereich der drei Segmente erfolgt eine redundante Abspeicherung von Punkten, da jedes Segment an diesem Punkt seinen Anfangs- bzw. Endpunkt besitzt (Abb. 14). Mit jeder Kreuzung beginnt ein neues Segment. Die Genauigkeit der Punkte beträgt ± 15 m.

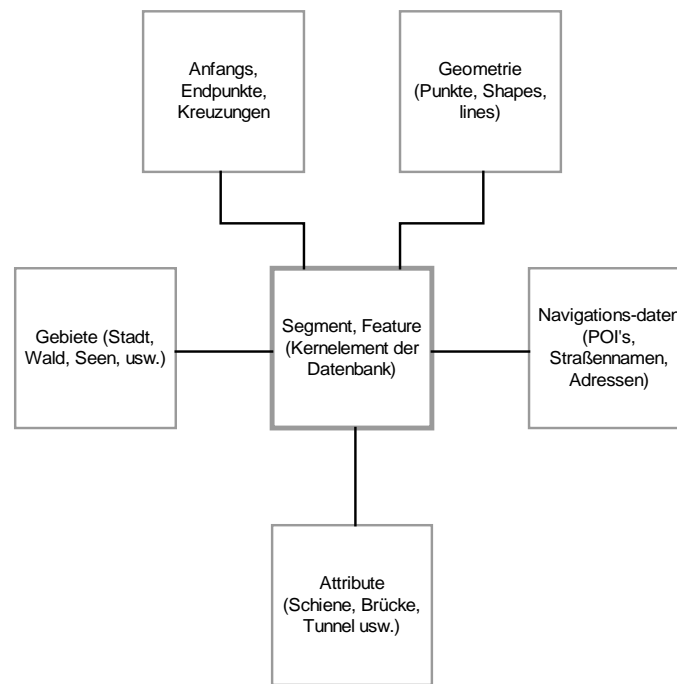


Abb. 13: Aufbau digitaler Karten Schraut (2000)

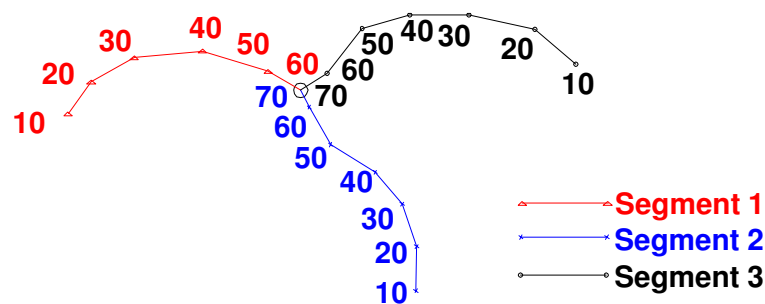


Abb. 14: Beschreibung eines Streckenzuges durch Segmente und shapes

Für die Bereitstellung zusätzlicher Funktionalitäten auf der Grundlage digitaler Karten ist es erforderlich, diese zu verändern bzw. zusätzliche Attribute hinzuzufügen. Die vorhandene digitale Karte für Führungsaufgaben liegt in einem komprimierten Binärformat vor (SDAL-Format). Es besteht keine Schreib- bzw. Änderungsmöglichkeit. Die Grundstruktur der digitalen Karte soll jedoch verwendet werden, um auf Routinen des Kartenherstellers zurückgreifen zu können. Außerhalb der feindigitalen Karte kann dann trotzdem ein Rest der Applikation zur Verfügung gestellt werden (z. B. Informationen über Ortseingänge, Straßennamen etc.). Um die vorliegenden Geometrieattribute zu ändern bzw. neue hinzuzufügen, wird eine zusätzliche Datenbank benötigt (Schraut 2000). Die Software **E**nhanced **D**atabase for **D**river **A**ssistance **S**ystems (EDDAS, Schraut 2000) koppelt an die vorhandene digitale Karte eine weitere, veränderbare Datenbank an. Mit Hilfe einer eindeutigen Segmentnummer (Segment ID) kann eine Beziehung zwischen

der konventionellen digitalen Karte und der Datenbank hergestellt werden. Bei der Befahrung einer Strecke wird die Segment ID der konventionellen Karte durch Routinen des Kartenherstellers ermittelt. Im nächsten Schritt wird in der zusätzlichen Datenbank abgefragt, ob Informationen zu diesem Segment vorhanden sind. Ist dies der Fall, werden alle Informationen zu Geometrie etc. aus dieser Datenbank entnommen. Liegen keine Informationen vor, werden die Daten aus der konventionellen digitalen Karte verwendet. Die neue Datenbank ersetzt teilweise die Inhalte der vorhandenen Karte und erweitert diese um zusätzliche Attribute.

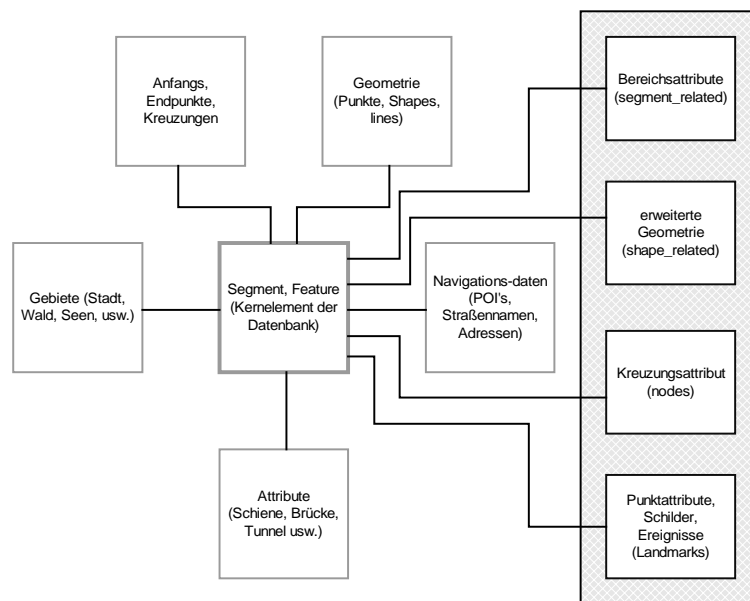


Abb. 15: Ankopplung einer zusätzlichen Datenbank an die Karte von NavTech (Schraut 2000)

In Abb. 15 ist der Aufbau der Datenbank dargestellt. Durch eine Änderung bzw. Ergänzung der Geometriedaten kann die digitale Karte verbessert werden. Als Prototyp liegt für einen Bereich nördlich von München eine „feindigitale Karte (fdk)“ vor. Dafür wurde eine zusätzliche Datenbank erstellt, die sich an die vorhandene digitale Karte an koppeln lässt. Die Straßen wurden mit einer größeren Punktdichte und Genauigkeit erfasst. Die Geometrie (Segmente und shapes) ist in der Tabelle shape related (siehe Abb. 15) der zusätzlichen Datenbank enthalten. In Tab. 2 ist der Aufbau der geometriebeschreibenden Tabelle dargestellt. Verkehrszeichen werden in Abhängigkeit der definierten Punkte in der Tabelle Landmarks abgelegt.

Feldbezeichnung	Datentyp	Beschreibung
p segment id	Long Integer	Segment ID (übernommen von NavTech)
shape index	Long Integer	Index der geometriebeschreibenden Punkte
latitude	Double	Breitengrad des Punktes
longitude	Double	Längengrad des Punktes
altitude	Double	Höhe des Punktes
VAL1-VAL5	Double	frei definierbare Werte

Tab. 2: Aufbau der Tabelle zur Beschreibung der Geometrie

3.5.3.2 SC auf der Grundlage von der vorhandenen Griffigkeit

Sind die Griffigkeit und Geometrie einer Straße bekannt, lässt sich mit Hilfe eines vereinfachten fahrdynamischen Modells (Punkt-Masse-Modell) die maximal fahrbare Geschwindigkeit berechnen (Glaser / Aguilera 2003). Durch den Ansatz weiterer Vereinfachungen lässt sich die zulässige Geschwindigkeit für einen Radius nach Gl. 1 berechnen. Die so ermittelten Geschwindigkeiten stellen eine „fahrdynamisch zulässige Höchstgeschwindigkeit“ dar. Diese entspricht nicht dem tatsächlichen Fahrverhalten. Aus diesem Grund ist dieser Ansatz für eine Geschwindigkeitsempfehlung oder Regelung nicht geeignet. Zudem kann die Griffigkeit eines Streckenabschnittes derzeit nicht flächendeckend bestimmt werden.

$$\begin{aligned}
 V_{kurve} &= \sqrt{127 \cdot R \cdot (f_R + q)} \\
 V_{kurve} &= \text{Geschwindigkeit}[km/h] \\
 f_R &= \text{radialerKraftschlussbeiwert}[-] \\
 q &= \text{Querneigung}[-]
 \end{aligned} \tag{1}$$

3.5.3.3 SC auf der Grundlage der Querbeschleunigung

Durch Hamberger (1999) wurde ein System umgesetzt, welches auf Grundlage einer zulässigen Querbeschleunigung eine Geschwindigkeit berechnet. Die empfohlene Geschwindigkeit ergibt sich zu:

$$\begin{aligned}
 v_{kurve} &= \sqrt{\frac{a_{quer}}{k}} \\
 v_{kurve} &= \text{Geschwindigkeit}[m/s] \\
 k &= \text{Kruemmung}[1/m] \\
 a_{quer} &= \text{Querbeschleunigung}[m/s^2]
 \end{aligned} \tag{2}$$

Die zulässige Querbeschleunigung wurde in Abhängigkeit vom Fahrertyp und vom Kurvenradius ermittelt (siehe Abb. 16).

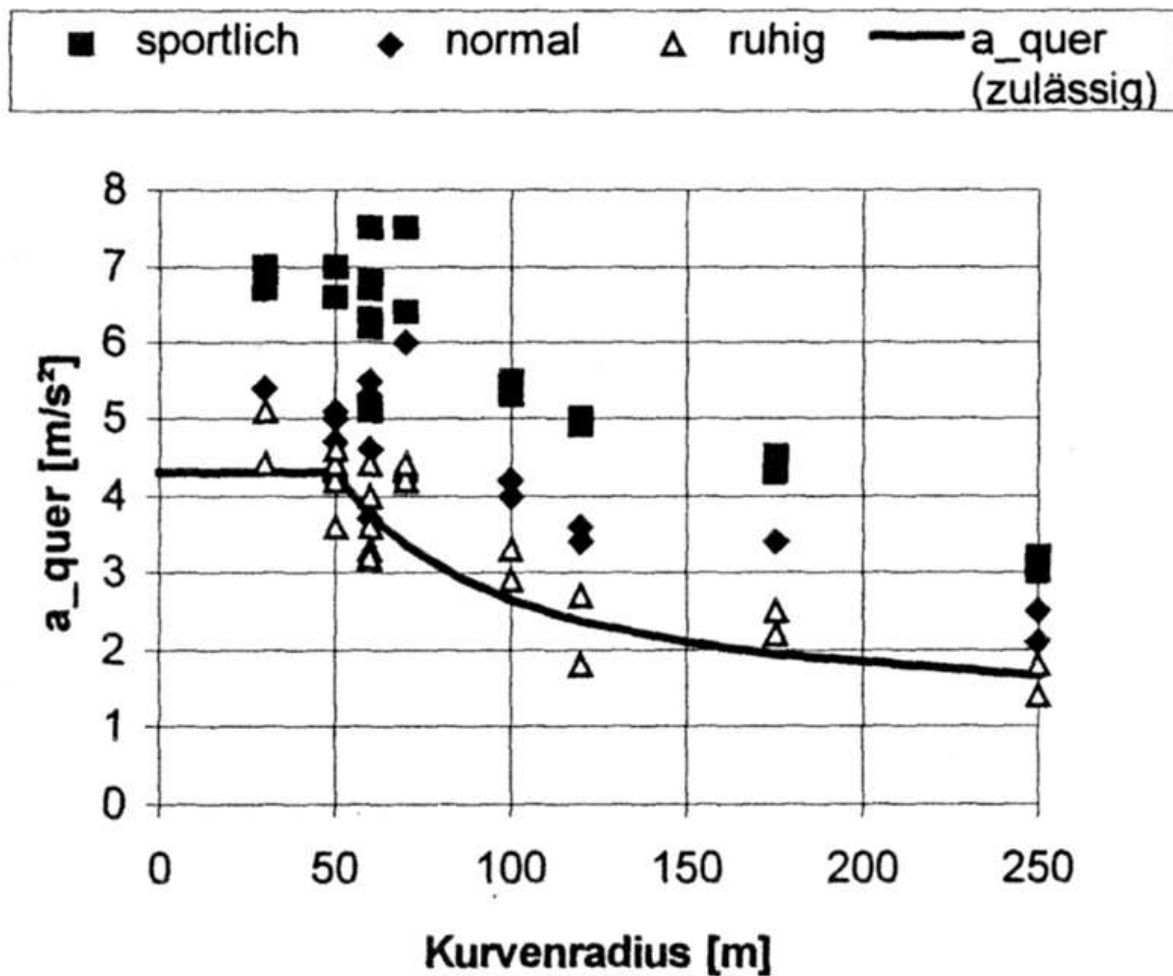


Abb. 16: Vom Fahrer akzeptierte Querbeschleunigung in Abhängigkeit des Fahrertyps und dem Radius aus Hamberger (1999)

Probanden gaben in Tests mit diesem System an, dass sich die Geschwindigkeiten teilweise gut an das eigene Fahrverhalten annähern. Hamberger (1999) sieht jedoch in diesem Ansatz keine Anwendung für ein Fahrerassistenzsystem Speed Control. Der Ansatz soll dazu genutzt werden, um bei Automatikgetrieben den Schaltvorgang zu beeinflussen. Dafür gibt er folgende Empfehlungen:

- Wird eine Kurve durchfahren, bei der die Fahrzeuggeschwindigkeit nur geringfügig oder gar nicht verringert werden muss, so sollte der gerade eingelegte Gang während der Kurvenfahrt gehalten werden.
- Muss durch die Kurve unbedingt die Fahrzeuggeschwindigkeit so weit verringert werden, dass die Weiterfahrt nach der Kurve eine Rückschaltung erforderlich macht, dann sollte dies schon vor der Kurve erfolgen.

- Während einer kurvenbedingten Verringerung der Fahrzeuggeschwindigkeit sollte frühzeitig zurückgeschaltet und/oder die Wandlerüberbrückungskupplung geschlossen werden, um ein hohes Motorbremsmoment zu erhalten.

Dieser Ansatz liefert für jede Kurve eine andere Geschwindigkeit. Dies führt zu einem sehr unruhigen Geschwindigkeitsprofil, welches nicht dem tatsächlichen Fahrverhalten entspricht. Aus diesem Grund ist der Ansatz für ein Fahrerassistenzsystem Speed Control nicht geeignet.

3.5.3.4 SC auf der Grundlage von Fahrverhaltensuntersuchungen

Von Schraut (2000) und Kohlhof (2001) wurde ein System umgesetzt, welches auf Regressionsformeln von Köppel / Bock (1970) aus dem Bereich der Forschung des Straßenentwurfs zurückgreift. Grundlage ist der empirisch ermittelte Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit, Radius, Richtungsänderung und Fahrbahnbreite. Die empfohlene Geschwindigkeit lässt sich mit der Gleichung 3 für $KU_E \leq 500 \text{ gon/km}$ und mit Gleichung 4 für $KU_E > 500 \text{ gon/km}$ berechnen.

$$V_{\text{kurve}} = 55,65 - 0,0532 \cdot KU_E + 5,314 \cdot B \quad (3)$$

$$V_{\text{kurve}} = 61,03 - 0,0819 \cdot KU_E + 0,00005 \cdot KU_E^2 + 4,85 \cdot B \quad (4)$$

V_{kurve} = Geschwindigkeit [km/h]

KU_E = Kurvigkeit Einzelelement [gon/km]

B = Fahrbahnbreite [m]

Für jede Kurve im Streckenverlauf wurde eine neue Geschwindigkeit berechnet. Eine Anpassung der Geschwindigkeit in Abhängigkeit des Fahrstilwunsches erfolgte nicht. Im S.A.N.T.O.S Projekt wurde ein SC System mit diesem Ansatz umgesetzt (Kohlhof 2001, Ebersbach u.a. 2002). Dieser wurde mit **Ansatz 1 - Einzelradien** bezeichnet. Von Probanden wurden die empfohlenen Geschwindigkeiten als zu hektisch bewertet. Dies ist damit zu begründen, dass bei jedem Lageplanelement eine neue Geschwindigkeitsprognose gegeben wird. Aus diesem Grund wurde in Anlehnung an die RAS-L 1995 ein **Ansatz 2 - Abschnittseinteilung** im Rahmen des S.A.N.T.O.S Projektes umgesetzt. Dafür wurde das Fahrverhalten über einen längeren Streckenabschnitt betrachtet. In Abbildung 17 ist der Verlauf eines V_{85} Profils dargestellt, das aus $n=40$ Einzelprofilen (Messwerten) berechnet wurde. Es zeigt Abschnitte, in denen eine nahezu konstante Geschwindigkeit gefahren wird (grüne Bereiche) und Einzelelemente, bei denen eine große Geschwindigkeitsänderung auftritt (gelbe Bereiche „Singularitäten“). Aus diesem Grund kann die Geschwindigkeit für einen längeren Streckenabschnitt nicht mit einem einzigen Ansatz zuverlässig abgeschätzt werden. Sowohl dem Beispiel als auch der einschlägigen Fachliteratur (vgl. Bock 1968, Lippold 1997, Köppel / Bock 1970) ist zu entnehmen, dass die Abschnitte mit einem annähernd gleichen Geschwindigkeitsverlauf auch eine durchgängig ähnliche Streckencharakteristik aufweisen. Demgegenüber sind abrupte Geschwindigkeitsänderungen in der Regel einer sich stark ändernden Streckencharakteristik zuzuordnen. Aus diesem Grund erfolgt eine Unterteilung der Strecken in:

- Abschnitte ähnlicher Streckencharakteristik und
- Singularitäten, in denen sich die Streckencharakteristik stark verändert (z. B. Kurven mit sehr kleinem Radius, schmale Brückendurchfahrten, Kuppen mit kleinen Halbmessern etc.).

Zur Abgrenzung der einzelnen Abschnitte untereinander und zu den Singularitäten wurden Kriterien definiert. Im aktuellen Richtlinienwerk RAS-L (1995) soll eine Abschnittseinteilung zur Geschwindigkeitsprognose nach dem Verlauf des Anstiegs der kumulierten Winkeländerung vorgenommen werden. Dieses Verfahren wurde in Bakaba (2000) weiterentwickelt und für das S.A.N.T.O.S Projekt (Weise u.a. 2001b) modifiziert. In der Abbildung 17 sind der Verlauf der kumulierten Richtungsänderung des Lageplanes sowie das Geschwindigkeitsband dargestellt. Es ist ersichtlich, dass sich mit einer deutlichen Änderung des Anstiegs der kumulierten Richtungsänderung auch die Geschwindigkeit ändert. In Singularitäten sind kurze steile Anstiege charakteristisch. In Anlehnung an die Verfahrensweise zur Abschnittseinteilung in der Straßenplanung RAS-L (1995) wird das Kriterium Änderung des Anstiegs der kumulierten Richtungsänderung zur Einteilung der Strecke in Abschnitte verwendet:

- Abschnitte mit annähernd gleicher Kurvigkeit (Anstieg der kumulierten Winkeländerung näherungsweise konstant) und
- Singularitäten, gekennzeichnet durch kurze Sequenzen mit einem Sprung der kumulierten Winkeländerung.

Ein Beispiel für die Abschnittseinteilung einer Außerortsstraße in Sachsen beinhaltet Abbildung 17.

Im Rahmen des Projektes S.A.N.T.O.S erfolgten keine speziellen Untersuchungen zur Entwicklung von Geschwindigkeitsprognosemodellen. Stattdessen wurden bekannte Prognosemodelle aus der Fachliteratur analysiert, bewertet und in einem Gesamtalgorithmus integriert. Es wurde ein leicht modifizierter Ansatz nach Lippold (1997) verwendet. Mit Hilfe dieses Geschwindigkeitsmodells werden nach dem aktuellen Regelwerk des Straßenentwurfs (RAS-L 1995) sicherheitsrelevante Parameter (Querneigung, Haltesichtweite etc.) bemessen.

Um den umgesetzten Algorithmus zu testen, wurden die mit dem S.A.N.T.O.S Demonstrator geregelten Geschwindigkeiten, mit gemessenen Geschwindigkeiten aus Verfolgungsfahrten verglichen. Bei dem Vergleich der berechneten Geschwindigkeiten mit den Geschwindigkeiten aus den Verfolgungsfahrten wurde festgestellt, dass die prognostizierten Geschwindigkeiten im Mittel 5% über den gemessenen Werten liegen. Der Grund dafür ist, dass der hier verwendete Geschwindigkeitsansatz zur Festlegung sicherheitstechnischer Größen im Straßenentwurf entwickelt wurde. Der Ansatz berechnet eine obere „Hüllkurve“ der zu erwartenden Geschwindigkeiten. Deshalb erfolgte eine Reduzierung der berechneten V_{85} nach RAS-L (1995) um 5%.

Abbildung 18 enthält einen Vergleich der gemessenen Geschwindigkeit V_{85} aus Verfolgungsfahrten und der vom S.A.N.T.O.S Demonstrator geregelten Geschwindigkeit nach

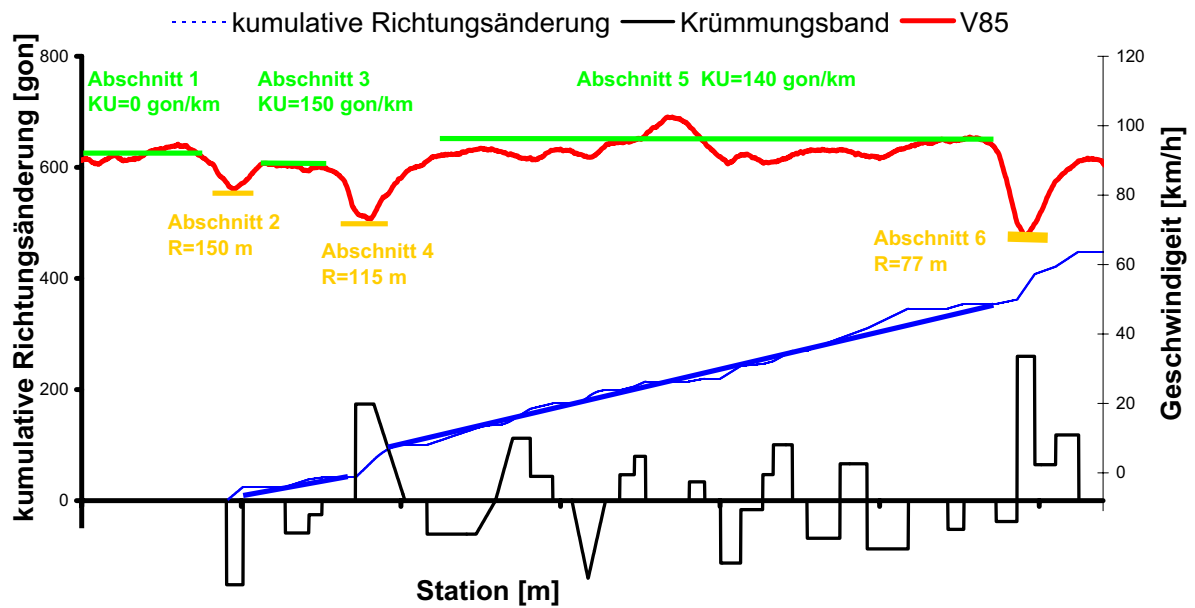


Abb. 17: Abschnittseinteilung für eine Außerortsstraße

dem modifizierten (um 5 % reduzierten) Geschwindigkeitsansatz bei einer Versuchsfahrt. Systembedingt wird die berechnete Geschwindigkeit als Zielgröße behandelt und diese mit festgelegten Einstellungen zur Beschleunigung erreicht. Es geht hervor, dass die vom S.A.N.T.O.S - Demonstrator umgesetzte Geschwindigkeit eine gute Näherung an das tatsächliche Fahrverhalten darstellt.

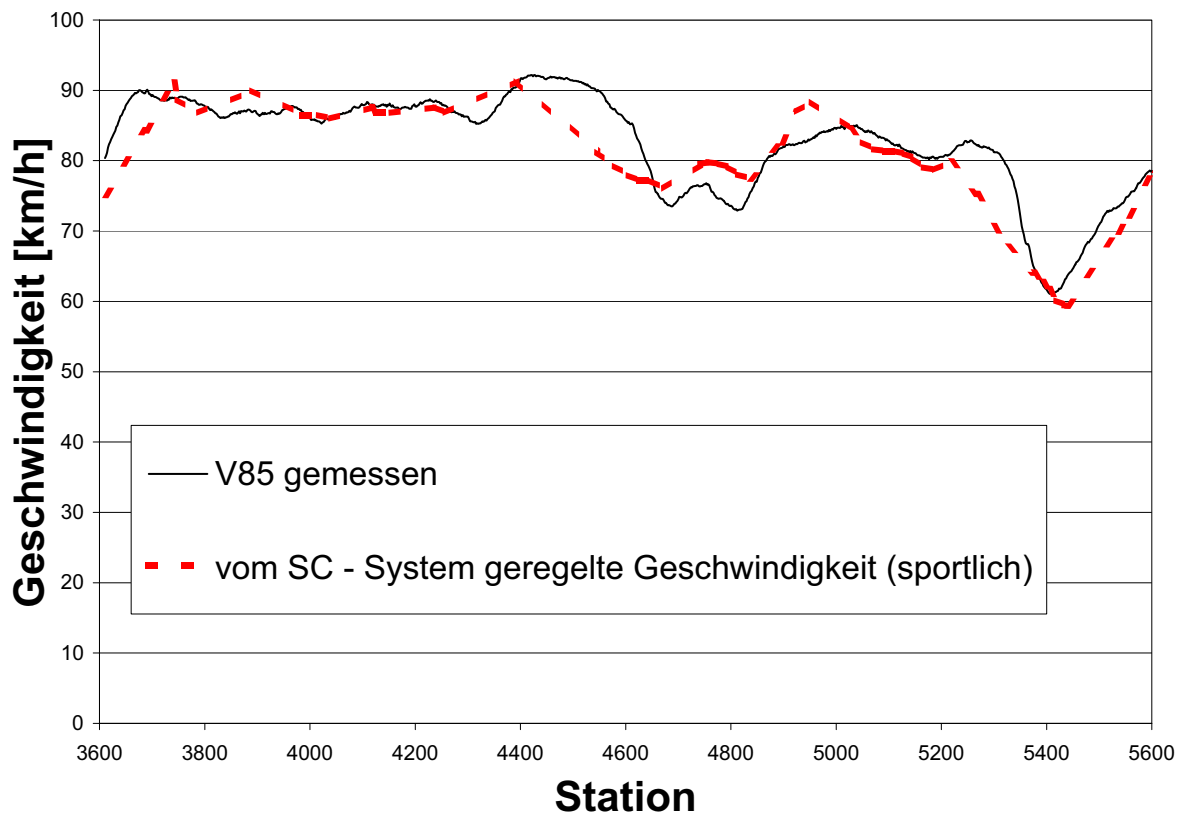


Abb. 18: Vergleich der vom SC geregelten Geschwindigkeit und der gemessenen Geschwindigkeit V_{85}

3.6 Zusammenfassung

Die Ergebnisse aus der Literaturanalyse zu Anforderungen an Fahrerassistenzsysteme und zu ersten Umsetzungen eines Fahrerassistenzsystems Speed Control lassen sich wie folgt zusammenfassen:

1. Die berechneten Geschwindigkeiten mit Prognosealgorithmen aus dem Bereich des Straßenentwurfs (RAS-L 1995) eignen sich nur bedingt, für eine Geschwindigkeitsprognose in einem Assistenzsystem. Sie wurden entwickelt, um sicherheitsrelevante Größen (Querneigung, Haltesichtweite etc.) zu bemessen. Sie erlauben keine Anpassung an Fahrertypen. Deshalb müssen für ein Fahrerassistenzsystem Speed Control spezielle Geschwindigkeitsprognosealgorithmen entwickelt werden, die auch eine Anpassung an Fahrertypen erlauben. Dabei sollen nur Variablen verwendet werden, die in der digitalen Karte verfügbar sind.
2. In Abhängigkeit vom Fahrstilwunsch soll sich ein Assistenzsystem an die Umgebungsbedingungen (Regen, Dunkelheit) anpassen. Deshalb sollen diese Variablen in das Geschwindigkeitsmodell integriert werden.

3. Die Fahrertypen unterscheiden sich nicht nur in der Höhe der gefahren Geschwindigkeit, sondern auch durch die Wahl unterschiedlich großer Längsverzögerungen. Deshalb müssen Längsbeschleunigungsmodelle zur Ermittlung des optimalen Empfehlungsbzw. Regelungszeitpunktes in Abhängigkeit vom Fahrstilwunsch entwickelt werden.
4. Die Unterteilung der Strecke in Abschnitte ähnlicher Streckencharakteristik und Singularitäten hat sich bewährt. Bei der Umsetzung des Fahrerassistenzsystems „Speed Control“ im Rahmen des S.A.N.T.O.S Projektes wurde diese Einteilung manuell vorgenommen. Für eine allgemein gültige Umsetzung muss eine automatisierte Abschnittseinteilung entwickelt werden, welche auf der Grundlage einer diskreten Punktfolge den vorausliegenden Streckenabschnitt in Singularitäten und Abschnitte ähnlicher Streckencharakteristik einteilt.
5. Die Algorithmen des Assistenzsystems müssen in einem Versuchsprogramm (Probandenfahrten) getestet werden, um Informationen zur Akzeptanz des Systems zu erhalten.

Unter diesen Zielstellungen muss eine weitere Entwicklung und Validierung des Fahrerassistenzsystems Speed Control erfolgen. Die Modelle können nur auf der Grundlage von gemessenen Geschwindigkeits- und Beschleunigungsprofilen entwickelt werden. In den folgenden Kapiteln erfolgt eine Literaturanalyse zu den Einflüssen auf das Geschwindigkeits- und Beschleunigungsverhalten von Kraftfahrern in Abhängigkeit von der Streckengeometrie und den Umfeldbedingungen.

4 Fahrverhalten

4.1 Externe Einflüsse auf das Geschwindigkeitsverhalten

4.1.1 Kurvigkeit

Neben dem Radius (siehe Kap. 4.1.2) wird die Kurvigkeit als maßgebend für das Geschwindigkeitsverhalten genannt. Sie bezieht sich nicht auf ein Einzelelement sondern auf einen Streckenabschnitt. Sie ist definiert als Summe aller Richtungsänderungen bezogen auf die Streckenlänge (Gl. 5).

$$KU = \frac{\sum \gamma_i}{L} \quad (5)$$

KU	[gon/km]	Kurvigkeit
γ_i	[gon]	Richtungsänderung des betrachteten Streckenabschnittes
L	[km]	Länge des Streckenabschnittes

In den Arbeiten von Trapp (1971), Dilling (1973), Köppel / Bock (1979), Appelt (1998) Sosouhmihen (2001), Bakaba (2000) u. a. wurde die Kurvigkeit zur Beschreibung des Geschwindigkeitsverhaltens genannt. Lippold (1997) gibt in Abhängigkeit von der Fahrbahnbreite einen linearen bzw. quadratischen Zusammenhang zwischen Kurvigkeit, Fahrbahnbreite und Geschwindigkeit an. Für schmale Fahrbahnen (kleiner 5,50 m) wird dieser durch eine quadratische Parabel beschrieben. Bereits Schlichter (1976) führte aus, dass Strecken sich trotz gleicher Kurvigkeit in ihrer Charakteristik deutlich unterscheiden können.

In Abb. 19 sind zwei unterschiedliche Strecken und die gemessenen Geschwindigkeiten V_{85} und V_{15} dargestellt. Die Linke abgebildete Strecke ist eine moderne relationstrassierte Strecke. Ersichtlich ist, dass eine homogene hohe Geschwindigkeit gefahren wird. Die rechts abgebildete Strecke besitzt die gleiche Kurvigkeit. Sie unterscheidet sich jedoch in ihrer Charakteristik deutlich von der links abgebildeten. Die Geschwindigkeiten sind sehr heterogen, es erfolgt eine ständige Änderung. Aus diesem Grund weisen einige Autoren (Lamm 1973, Schlichter 1976, Bakaba 2000 u. a.) darauf hin, dass die Kurvigkeit allein nicht zur Beschreibung der Streckencharakteristik und des Fahrverhaltens ausreicht.

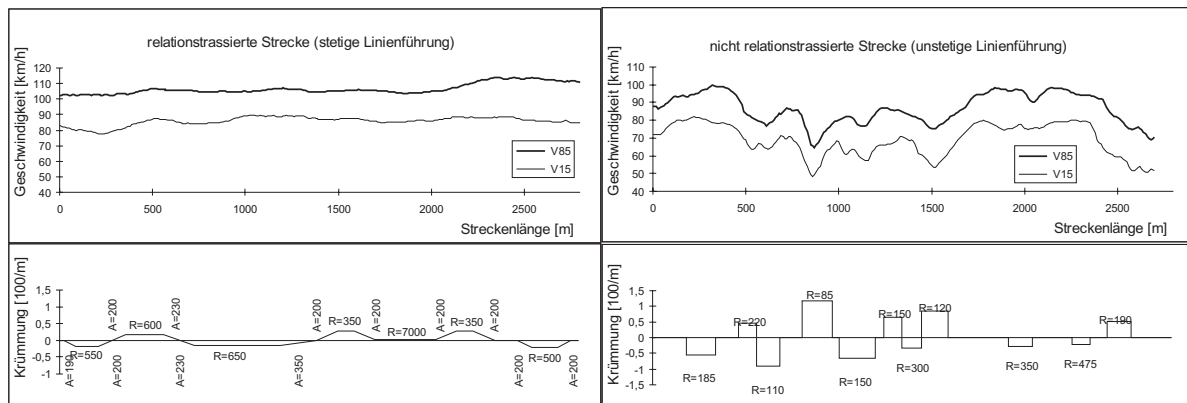


Abb. 19: Strecken mit unterschiedlicher Streckencharakteristik und gleicher Kurvigkeit

Ein erster Versuch zu einer algorithmierbaren Abschnittsbildung erfolgte von Bakaba (2000). Anhand der Summenlinie der absoluten Winkeländerung (kumulierte Winkeländerung) wurde eine manuelle Einteilung in Sequenzen vorgenommen. Folgende Bedingungen innerhalb eines Abschnittes müssen dabei erfüllt werden:

1. $\Delta KU \geq 50$ gon/km zur nächsten Sequenz und
2. bei nicht relationstrassierten Strecken
 - Geradenlänge innerhalb einer Sequenz $\leq (250 \text{ m} - 300 \text{ m})$ und
 - minimaler Radius in einer Sequenz $R > 120 \text{ m}$.

Werden diese Bedingungen nicht erfüllt, müssen die Grenzen neu gewählt werden. Dieses Verfahren wurde an mehreren Messstrecken getestet, es enthält erste brauchbare Ansätze für eine objektive Abschnittsbildung.

4.1.2 Lageplankurve

Der Einfluss kleiner Radien ($R < 300 \text{ m}$) auf das Fahrverhalten ist in der Literatur unbestritten (Fiedler 1967, Köppel / Bock 1979, Al Kassar u.a. 1981, Steierwald / Buck 1992, Lippold 1997, Belopitov / Spacek 1999 etc.). Besonders ausgeprägt ist der Zusammenhang zwischen Radius und Geschwindigkeit bis zu einem Radius von 150 m (Sosoumihien 2001). Ab Radien größer 250 m tritt der Einfluss zurück (Abb. 20). Die Untersuchungen in der Schweiz von Belopitov / Spacek (1999) kamen zu dem Schluss, dass ab einer Radiengröße von $R > 120 \text{ m}$ praktisch keine Anpassung der Geschwindigkeit an die horizontale Krümmung mehr stattfindet. Bei diesen Untersuchungen ist zu beachten, dass die gesetzlich zulässige Höchstgeschwindigkeit auf Außerortsstraßen in der Schweiz 80 km/h beträgt. Bei einem Radius von 120 m wird auch in den Untersuchungen von Lippold (1997) eine Geschwindigkeit von 80 km/h erreicht (siehe Abb. 20).

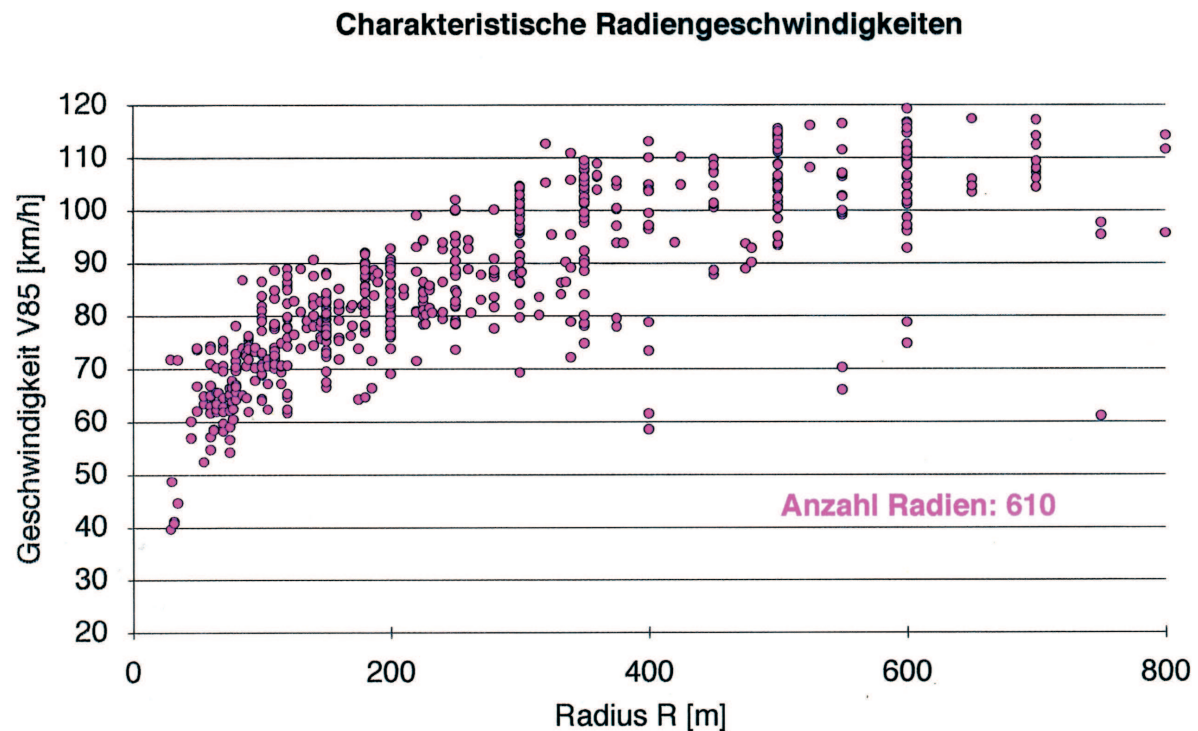


Abb. 20: Zusammenhang Radius - Geschwindigkeit (Lippold 1997)

In den Untersuchungen von Lamm u.a. (1982) wird anstelle vom Radius die Kurvigkeit des Einzelelementes verwendet (Gl. 8). Dies ist jedoch nur eine andere Darstellung, da zwischen der Kurvigkeit des Einzelelementes und dem Radius ein direkter mathematischer Zusammenhang besteht (siehe dazu Bakaba 2000). Eine Kurvigkeit des Einzelelementes von $KU_E = 200$ gon/km entspricht einem Radius von ca. 300 m. Wie der Abb. 20 zu entnehmen ist, streuen die gemessenen Geschwindigkeiten für einen Radienbereich stark. Dies liegt zum einen an der gewählten Untersuchungsmethode und deutet zum anderen darauf hin, dass es weitere Einflussgrößen auf die Geschwindigkeit gibt (siehe dazu bereits Köppel / Bock 1970).

Neben dem Radius einer Kurve werden in der Literatur

- der Richtungsänderungswinkel,
- der Annäherungsbereich,
- die Fahrbahnbreite (siehe Kap.4.1.3) und
- die Sichtweite (siehe Kap. 4.1.5)

als Einflussparameter genannt. Bereits Krebs (1973) ging davon aus, dass bei einem **Richtungsänderungswinkel** $\alpha < 17$ gon durch „Schneiden“ der Kurve im eigenen Fahrstreifen ein beträchtlicher Radiengewinn erzielt werden kann. Kupke (1977) wies in seinen

Simulatorexperimenten einen Einfluss des Richtungsänderungswinkels nur im unteren Radienbereich ($R < 150$ m) nach. Belopitov / Spacek (1999) kamen in ihren Untersuchungen zu dem Ergebnis, dass bei Richtungsänderungswinkeln von $\alpha < 30$ gon vor allem in Linkskurven höhere Geschwindigkeiten gemessen wurden. Sie begründeten dies damit, dass in Linkskurven mehr Platz zum Kurvenschneiden zur Verfügung steht. In Linkskurven waren die gefahrenen Radien um maximal 10 % größer als der gebaute Radius. Bei Sosouhmien (2001) wurde das Verhältnis Radius zu Richtungsänderung als spezifische Richtungsänderung (α/R) eingeführt. Er stellte fest, dass bei Werten von α/R kleiner 1,5 die Messwerte stark streuen. Ist das Verhältnis α/R größer als 1,5 nimmt die Streuung ab. Sosouhmien (2001) gibt folgende mathematische Beziehung zwischen gebautem Radius, gefahrenem Radius und Richtungsänderungswinkel an:

- Linkskurven:

$$R_f = 136,16 \cdot \left(\frac{\alpha}{R_g} \right)^{-0,4338} \quad r = 0,81 \quad (6)$$

- Rechtskurven:

$$R_f = 74,512 \cdot \left(\frac{\alpha}{R_g} \right)^{-0,6017} \quad r = 0,88 \quad (7)$$

R_f	[m]	gefahrter Kurvenradius
R_g	[m]	gebauter Kurvenradius
α	[gon]	Öffnungswinkel

In Abb.21 ist der Zusammenhang grafisch dargestellt. Ersichtlich ist, dass in Linkskurven ein bedeutend größerer Radiengewinn erzielt wird als in Rechtskurven. Mit zunehmendem Richtungsänderungswinkel nimmt der Einfluss des Richtungsänderungswinkels auf den gefahrenen Radius ab.

Bereits Köppel / Bock (1979) stellten bei ihren Untersuchungen fest, dass die **vorge-lagerte Streckencharakteristik** einen Einfluss auf die gewählte Elementgeschwindigkeit besitzt. Sie entwickelten ein radienabhängiges Berechnungsverfahren zur Geschwindigkeitsprognose, bei der die vorgelagerte und nachgelagerte Kurvigkeit mit einbezogen werden. Die Länge des relevanten Annäherungsbereiches an eine Kurve wurde in Steierwald / Buck (1992) mit 400 m angegeben. Steyer / Sosouhmien (1997) beschrieben den Annäherungsbereich durch eine mittlere gewichtete Kurvigkeit. Dieser setzt sich aus den Kurvigkeiten der Einzelelemente zusammen (Gl. 9). Es erfolgt eine Wichtung der Elemente. Je näher ein Element an der betrachteten Kurve liegt, desto höher ist der Rangfaktor f_i . Das am weitesten entfernte Element erhält den Rangfaktor 1. Das sich direkt vor der Kurve befindende Element bekommt den Rangfaktor n. Bei dieser Untersuchung wurde das Einzelelement nicht durch den Radius sondern durch die Kurvigkeit beschrieben (Gl. 8).

$$KU_E = \frac{\alpha}{L_K} \cdot 1000 \quad (8)$$

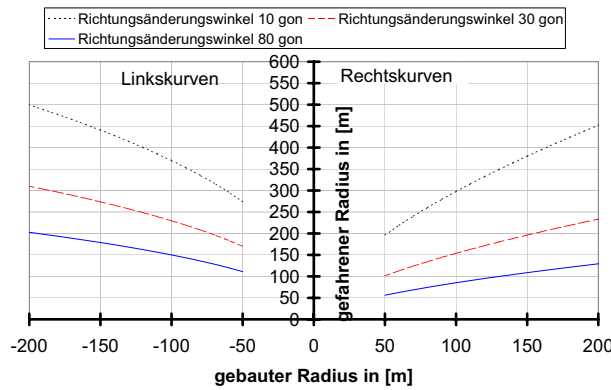


Abb. 21: Zusammenhang zwischen Radius, Richtungsänderungswinkel und gefahrenem Radius nach Sosouhmien (2001)

KU_E	[gon/km]	Kurvigkeit des Einzelelementes
α	[gon]	Richtungsänderungswinkel der Kurve
L_K	[m]	Länge der Kurve

$$K_G = \frac{\sum_{i=1}^n f_i \cdot K_{E_i} \cdot L_i}{\sum_{i=1}^n f_i \cdot L_i} \quad (9)$$

K_G	[gon/km]	mittlere gewichtete Kurvigkeit des Annäherungsbereiches
K_{E_i}	[gon/km]	Kurvigkeit des Einzelelementes i
f_i	[-]	Rangfaktor für das Element i
L_i	[km]	Länge des Elementes i
n	[-]	Anzahl der Elemente im Annäherungsbereich

$$\Delta KU = K_E - K_G \quad (10)$$

ΔKU	[-]	Kurvigkeitsdifferenz
K_E	[gon/km]	Kurvigkeit der betrachteten Kurve
K_G	[gon/km]	mittlere gewichtete Kurvigkeit des Annäherungsbereiches

Als Bewertungskriterium wurde die Kurvigkeitsdifferenz zwischen Annäherungsbereich und betrachteter Kurve (Gl. 10) verwendet. Sosouhmien (2001) stellte einen Zusammenhang zwischen Annäherungsgeschwindigkeit und mittlerer gewichteter Kurvigkeit sowie zwischen dem Geschwindigkeitsverhältnis aus Annäherungsgeschwindigkeit und Kurvengeschwindigkeit (V_K/V_A) fest (Abb. 22).

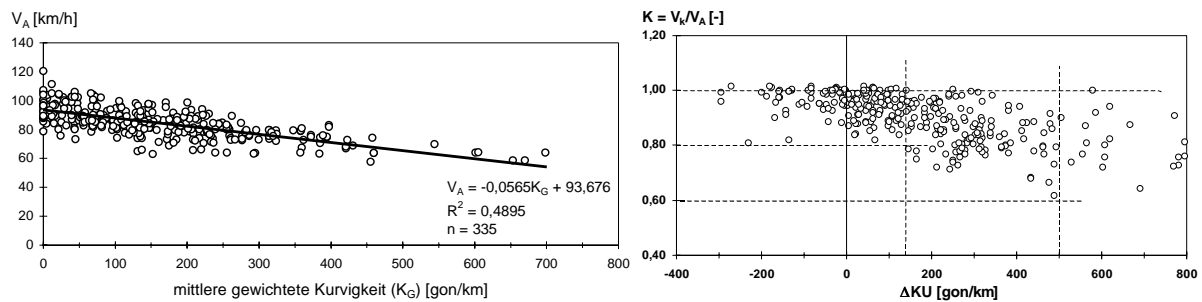


Abb. 22: Zusammenhang zwischen Annäherungsgeschwindigkeit und K_G (links) sowie zwischen Geschwindigkeitsdifferenz und ΔKU Sosouhmihen (2001)

4.1.3 Fahrbahnbreite

Die Auswirkungen der Fahrbahnbreite auf die Geschwindigkeit wird in der Literatur differenziert dargestellt. Nach Trapp (1971) hat die Fahrbahnbreite keinen Einfluss, wenn die Randstreifenbreite mind. 0,5 m beträgt. Für Lamm (1973) existierte ein schwacher statistischer Zusammenhang zwischen Fahrbahnbreite und Geschwindigkeit. Bei einer größeren Änderung der Fahrbahnbreite stellten Trapp / Oellers (1974) ein unterschiedliches Fahrverhalten fest. Köppel / Bock (1979) beobachteten, dass bei gleicher Kurvigkeit aber geringeren Fahrbahnbreiten das Geschwindigkeitsniveau sinkt. Al Kassar u.a. (1981) beschreiben einen erheblichen Einfluss der Rand- und Seitenstreifenbreite auf die Geschwindigkeit. Lippold (1997) differenziert bei der Prognose der Geschwindigkeit nur in zwei unterschiedliche Fahrbahnbreiten (kleiner 6,0 m und größer 6,0 m).

4.1.4 Dunkelheit und Regen / Nässen

Die Auswirkungen von Dunkelheit und Regen auf das Fahrverhalten sind sehr wenig erforscht. In der Literatur sind unterschiedliche Aussagen vorhanden. Zuberbühler (1964) stellte bei Regen eine Reduzierung der mittleren Fahrgeschwindigkeit um 2,8 km/h fest. Hiersche u.a. (1989) untersuchten den Einfluss des Regens auf die Geschwindigkeit. Sie führten Messungen an drei Querschnitten auf einer Bundesstraße (Querschnitt Q1: $R=735$ m; Querschnitt Q2: $R=500$ m; Querschnitt Q3: $R=\infty$) durch. In Abhängigkeit der Wasserfilmdicke wurden vier Feuchtigkeitsklassen von 1 (benässte Fahrbahn) bis 4 (geschlossener Wasserfilm auf Fahrbahn) definiert. Es konnte nicht bei allen Feuchtigkeitsklassen eine ausreichende Anzahl von Messwerten aufgenommen werden. Die Ergebnisse sind in Abb. 23 dargestellt. Der Abbildung ist zu entnehmen, dass mit zunehmender Feuchtigkeitsklasse die Geschwindigkeit über alle Quantile abnimmt. Mit größer werden dem Radius nähern sich die Geschwindigkeiten an. Bei einem Radius von 375 m betragen die Geschwindigkeitsunterschiede 35 km/h, auf einer Geraden maximal 10 km/h.

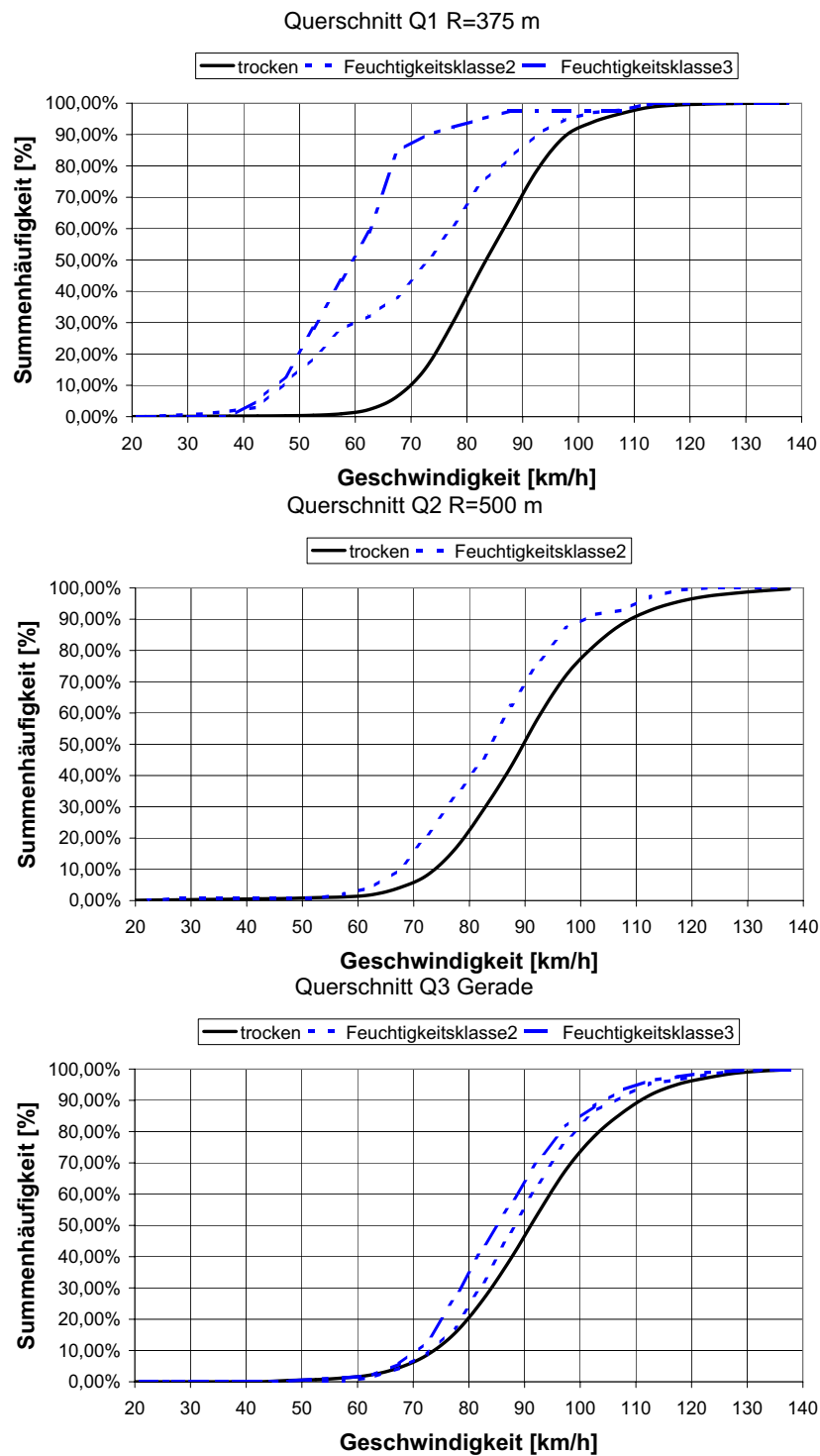


Abb. 23: Einfluss der Feuchtigkeitsklasse auf das Fahrverhalten Hiersche u.a. (1989)

Im Gegensatz zu Hiersche u.a. (1989) beobachtete Lippard (1994) eine Erhöhung der Geschwindigkeit im Mittel um 4 km/h bei Nässe. Thoma (1994) führte Geschwindigkeitsmessungen auf Außerortsstraßen bei unterschiedlichen Witterungsbedingungen durch. Nach der Regenintensität unterschied er in leichten Regen (0,5 bis 0,9 mm/h); mäßigen Regen (1,0 bis 2,9 mm/h) und starken Regen (>3,0 mm/h). Die Quantifizierung der Regenmenge unterscheidet sich von der Definition nach Hiersche u.a. (1989). Aus diesem Grunde können die Werte nicht direkt miteinander verglichen werden. Die Ergebnisse der Messungen sind in Tab. 3 dargestellt. Zu erkennen ist, dass die Geschwindigkeiten nachts um 5 bis 7 km/h ansteigen. Bei Tageslicht und Nässe ist erst bei starkem Regen eine Reduzierung der Geschwindigkeit zu beobachten. Bei Nacht und Regen werden tendenziell die gleichen Geschwindigkeiten wie am Tag und Regen beobachtet.

	Parameter	trocken	Regen		
			leicht	mäßig	stark
Tag	V_{mittel}	82	84	81	76
	V_{85}	92	94	90	83
Nacht	V_{mittel}	87	81	79	-
	V_{85}	99	92	91	-

Tab. 3: Geschwindigkeiten auf Außerortsstraßen bei unterschiedlicher Witterung Thoma (1994)

Eindeutige Aussagen zum Geschwindigkeitsverhalten bei Nässe und Nacht sind in der Literatur nicht zu finden. Die vorhandenen Aussagen widersprechen sich.

4.1.5 Sichtweite

Über den Einfluss der Sichtweite auf das Fahrverhalten hat sich die Meinung in der Literatur über die Jahre geändert. Während Hiersche (1968) noch davon ausging, dass sich die Sichtweite maßgeblich auf das Fahrverhalten auswirkt, wurde in weiteren Arbeiten von Trapp (1971), Lamm (1973), Trapp / Oellers (1974), Köppel / Bock (1979), Al Kassar u.a. (1981), Lippold (1997) und Sosouhmihen (2001) nachgewiesen, dass bei Verwendung der Variablen Kurvigkeit die Sichtweite in den Hintergrund tritt. Zwischen Sichtweite und Kurvigkeit ist eine Autokorrelation vorhanden (Bakaba 2000). Aus diesem Grund muss die Sichtweite nicht als gesonderte Größe erfasst werden. Einige Autoren wie Meewes u.a. und Durth / Bald (1986) gingen sogar davon aus, dass sich die Sichtweite nur auf den Ort und die Stärke der Fahrerreaktion (Längsverzögerung) auswirkt. Belopitov / Spacek (1999) wiesen nach, dass die Sichtweite in Einzelkurven die Geschwindigkeit beeinflusst. Die Kurven wurden in folgende Sichtweitenklassen eingeteilt:

- stark eingeschränkt (Sicht von Übergangsbogenanfang bis Kreisbogenanfang),
- eingeschränkt (Sicht von Übergangsbogenanfang bis Kreisbogenmitte) und

- nicht eingeschränkt (Sicht von Übergangsbogenanfang bis Kreisbogenende).

Weiterhin stellten sie fest, dass in den Kurven mit beschränkter Sicht tendenziell geringere Geschwindigkeiten als in den Kurven ohne beschränkte Sicht gefahren wurden. Eine Quantifizierung erfolgte nicht.

4.2 Externe Einflüsse auf das Beschleunigungsverhalten

4.2.1 Längsbeschleunigungsverhalten

Untersuchungen zum Zusammenhang zwischen der Geometrie der Straße und den gefahrenen Geschwindigkeiten sind häufig durchgeführt wurden (siehe Kap. 4.1).

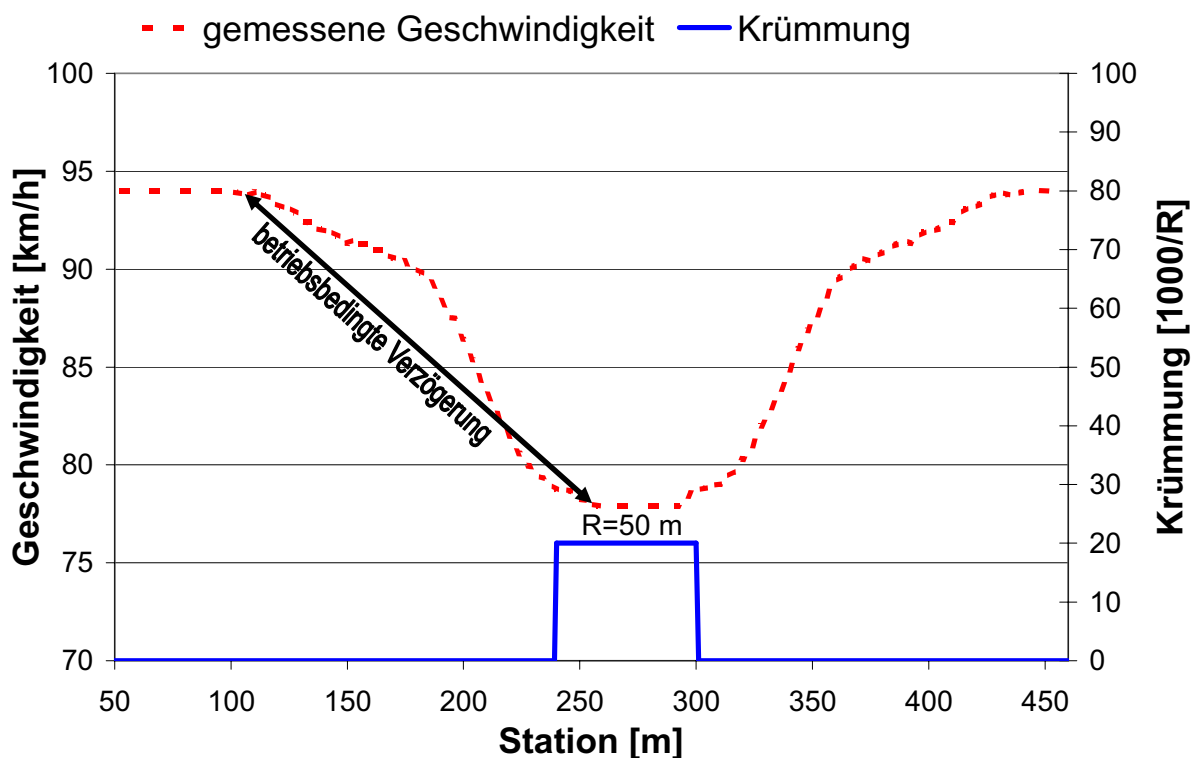


Abb. 24: Bereich betriebsbedingter Längsverzögerungen auf Grund der Streckencharakteristik

Die dazwischen stattfindenden betriebsbedingten Längs- und Beschleunigungsvorgänge sind jedoch recht wenig erforscht. In Abb. 24 ist ein solcher Bereich dargestellt. Dilling (1973) ging davon aus, dass die gewählte Längsverzögerung von der Größe der Krümmung abhängt. Bei der Untersuchung wurden mittlere Längsverzögerungen zwischen $0,68$ und $0,19 \text{ m/s}^2$ gemessen.

Die Untersuchung lässt sich wie folgt zusammenfassen:

- Die Annäherungsgeschwindigkeit besitzt einen entscheidenden Einfluss auf die Größe der Längsverzögerung.
- Mit kleinerem Radius nimmt die Größe der Längsverzögerung zu.
- Mit zunehmender Länge der Kurve nimmt die Größe der Längsverzögerung ab.
- Die Sichtweite besitzt keinen Einfluss auf die Größe der Längsverzögerung.

Krebs / Damianoff (1983) beobachteten, dass die Größe der Längsverzögerung von der Geschwindigkeitsdifferenz abhängt. Für den konkreten Fall in Abb. 24 beträgt diese ca. 17 km/h. Mit Hilfe der von Krebs / Damianoff (1983) ermittelten Regressionsgleichung (Gl. 11) lässt sich der Beginn des Bremsvorganges abschätzen. Die Länge und somit die gewählte Längsverzögerung ist nur von der Geschwindigkeitsdifferenz abhängig. In Abb. 25 ist der Zusammenhang umgerechnet auf die mittlere Längsverzögerung für unterschiedliche Ausgangsgeschwindigkeiten und Geschwindigkeitsdifferenzen dargestellt. Ersichtlich ist, dass mit zunehmender Geschwindigkeitsdifferenz die Größe der Längsbeschleunigung zunimmt. Mit geringerer Ausgangsgeschwindigkeit nimmt die Längsverzögerung ab.

$$L = 80,0 + 85,0 \cdot \ln |\Delta v| \quad (11)$$

Fuchs (1993) beobachtete bei seinen Untersuchungen mit Probanden bei freier, ungestörter Fahrt, dass vorsichtige Fahrer maximale Längsverzögerungen von ca. 2 m/s erreichen. Sportliche Fahrer erreichen Längsverzögerungen bis 4 m/s².

Lippold (1997) stellte fest, dass auf modernen (relationstrassierten) Strecken bedeutend geringere Längsverzögerungen (ca. 0,43 m/s²) als auf historischen Linienführungen (ca. 0,83 m/s²) gemessen wurden.

Lippmann (2002) untersuchte das Längsbeschleunigungsverhalten von Kraftfahrern auf Außerortsstraßen. Es wurde ein Einfluss der

- der Geschwindigkeitsdifferenz,
- der Ausgangsgeschwindigkeit und
- des Vorhandenseins eines Übergangsbogens

auf die Längsverzögerung und die Längsbeschleunigung festgestellt.

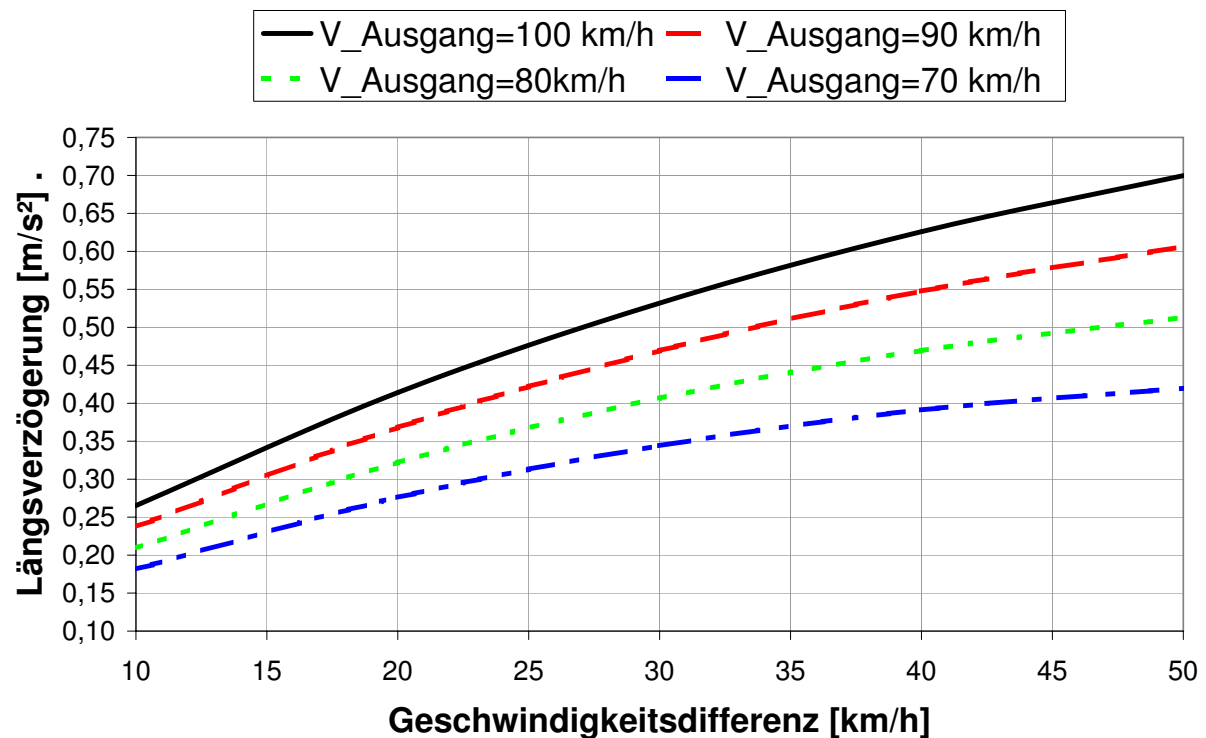


Abb. 25: Umrechnung des Bremsweges nach Krebs / Damianoff (1983) in mittlere Längsverzögerungen

4.2.2 Querschleunigungsverhalten

Viele Autoren bezeichnen die maximal auftretenden Querschleunigungen als Sicherheits- und Komfortkriterium. Die maximal akzeptierte Querschleunigung ist vom Fahrer abhängig. So akzeptieren sportliche Fahrer bedeutend größere Querschleunigungen als normale Fahrer. Manns (1985) untersuchte, welche Bedeutung die Querschleunigung als Sicherheits- und Komfortkriterium besitzt. Er kam zu folgenden Ergebnissen:

- Je größer der Richtungsänderungswinkel einer Kurve, desto größer sind die gemessenen Querschleunigungen innerhalb des komfortablen Bereichs.
- Je geringer die Radien sind, desto größer ist die maximale Querschleunigung.
- Wenn die Querschleunigung langsam ansteigt (z. B. durch einen langen Übergangsbogen), kann diese sehr hohe Werte annehmen, ohne dass dies durch den Fahrer als unangenehm empfunden wird.
- Plötzlich auftretende Querschleunigungen werden vom Fahrer als unangenehm empfunden.

Er legt als Komfortgrenze eine Querschleunigung von $3,0 \text{ m/s}^2$ und als Sicherheitsgrenze $4,0 \text{ m/s}^2$ fest. In den Untersuchungen von Lippold (1997) wurden diese Werte

nicht bestätigt. Bei Radien kleiner als 300 m betrug das 85 % Quantil der gemessenen Querbeschleunigung $4,6 \text{ m/s}^2$. Dieser Wert liegt oberhalb der von Manns (1985) definierten Komfortgrenze.

Belopitov / Spacek (1999) stellten ebenfalls Querbeschleunigungen von bis zu 6 m/s^2 fest.

Fuchs (1993) gibt an, dass sportliche Fahrer Querbeschleunigungen bis 6 m/s^2 und vorsichtige Fahrer bis 4 m/s^2 erreichen. Bei dieser Untersuchung wurde ebenfalls festgestellt, dass die auftretende Querbeschleunigung von der Streckencharakteristik abhängt und somit von Strecke zu Strecke variiert.

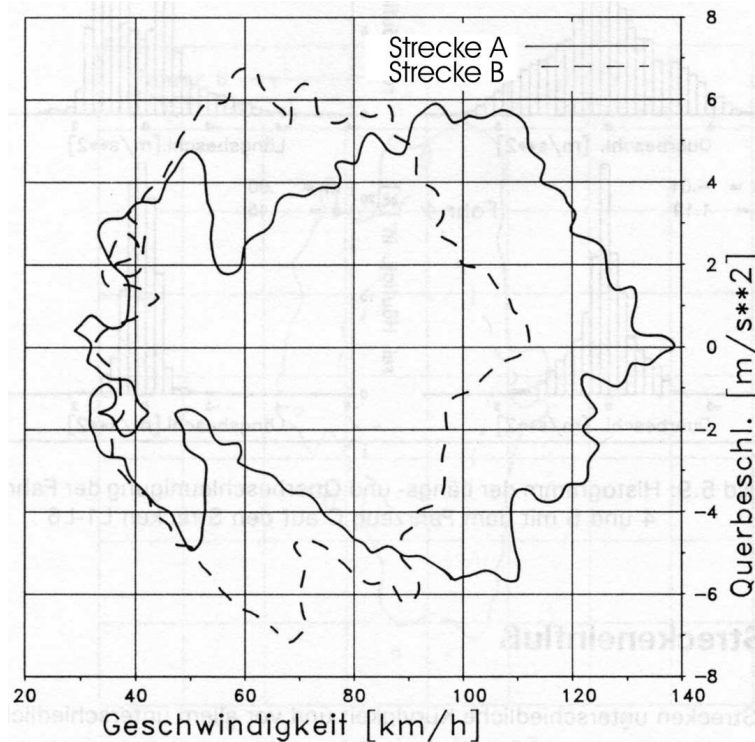


Abb. 26: Querbeschleunigung eines Fahrers auf 2 verschiedenen Strecken aus Fuchs (1993)

In Abb. 26 ist der Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit und Querbeschleunigung für einen Fahrer dargestellt. Dieser hat zwei unterschiedliche Strecken befahren. Ersichtlich ist, dass für den gleichen Fahrer auf verschiedenen Strecken in jedem Geschwindigkeitsbereich andere Querbeschleunigungen von der Größe und der Verteilung gemessen wurden. Zu ähnlichen Ergebnissen kam auch Hamberger (1999) (Kap. 3.5.3.3). Er beobachtete, dass die akzeptierten Querbeschleunigungen von der Geschwindigkeit und vom Fahrertyp abhängen.

4.3 Zusammenfassung

Für die Prognose der Geschwindigkeit für ein Speed Controls System (SC) eignen sich aus Fahrverhaltensuntersuchungen abgeleitete Modelle. Die Algorithmen aus dem Straßenentwurf lassen sich jedoch nicht für den Einsatz in einem Fahrerassistenzsystem übertragen. In der Literatur sind viele Modelle zur Beschreibung des Fahrverhaltens in Abhängigkeit von der Straßengeometrie enthalten. Die Messkollektive zur Ableitung der Regressionsgleichungen sind stark unterschiedlich. Prinzipiell sind zwei Typen von Geschwindigkeitsprognosemodellen zu finden:

1. Es wird die Geschwindigkeit für ein einzelnes Lageplanelement bzw. eine Station vorhergesagt. Mögliche Eingangsgrößen sind:
 - der Lageplanradius,
 - der Richtungsänderungswinkel,
 - die Fahrbahnbreite,
 - die Längsneigung im Höhenplan,
 - die dem betrachteten Element vorgelagerte Streckengeometrie und
 - die Sichtweite.
2. Die Geschwindigkeit wird für einen längeren Streckenabschnitt bestimmt. Dieser wird durch abgeleitete Größen (Mittelwerte) charakterisiert:
 - die Kurvigkeit und
 - die Fahrbahnbreite.

Bei Anwendung der Modelle des Typs 1 wird für jedes neue Lageplanelement eine Geschwindigkeit berechnet. Dies führt zu einem sehr heterogenen Geschwindigkeitsprofil, welches nicht der Realität entspricht. Besonders wichtig ist dann der Übergang zwischen den Elementen und die Länge sowie die Abfolge. Aus diesem Grund werden diese Modelle nur zur Beurteilung von einzelnen Stellen in der Linienführung angewendet. Bei den Modellen des Typs 2 wird eine mittlere Geschwindigkeit für einen Streckenabschnitt prognostiziert. Dies führt zu einem homogenen Geschwindigkeitsverlauf. Probleme treten bei der Bildung der Sequenzen auf. Wegen der Beschreibung des Streckenabschnittes mit einem Mittelwert kann es passieren, dass für einzelne Elemente zu hohe Geschwindigkeiten berechnet werden. Der im Rahmen des S.A.N.T.O.S Projektes (Kap. 3.5.3.4) verfolgte Ansatz einer Abschnittseinteilung ermöglicht eine, an das Fahrverhalten angelehnte und allgemein gültige, Geschwindigkeitsprognose.

Aus diesem Grund ist eine Zweiteilung zur Prognose des Geschwindigkeitsverlaufes sinnvoll. Eine Strecke sollte in:

1. Abschnitte ähnlicher Streckencharakteristik und
2. fahrverhaltenbeeinflussende Singularitäten

eingeteilt werden. Die Abschnitte sind auf Basis des Fahrverhaltens zu bilden, damit eine gute Annäherung an das tatsächliche Verhalten erreicht wird. Grundlage für die Geschwindigkeitsprognose ist die digitale Karte. Aus dieser können die Parameter:

1. Radius,
2. Richtungsänderungswinkel,
3. Fahrbahnbreite,
4. die dem betrachteten Element vorgelagerte Streckengeometrie und die
5. Kurvigkeit

direkt entnommen oder berechnet werden. Die Variablen Sichtweite und Variablen des Höhenplanes stehen nicht zur Verfügung. Da deren Einfluss auf das Fahrverhalten (siehe Kap. 4.1.5) nicht eindeutig nachgewiesen ist, kann auch auf diese verzichtet werden.

Bei der Auslegung eines solchen Systems ist darauf zu achten, dass der Fahrer immer die Kontrolle über sein Fahrzeug hat. Unterschiedliche Fahrerwünsche und Fahrerzustände fordern eine andere Auslegung des Systems (Ort der Reaktion, Stärke der Reaktion etc.). Um dies zu ermöglichen, muss der Zeitpunkt der Reaktion in Abhängigkeit vom Fahrstil prognostiziert werden (Längsbeschleunigungsmodell). Eine Anpassung der Geschwindigkeit an Witterungsverhältnisse sollte in Abhängigkeit vom Fahrstilwunsch erfolgen.

In der Literatur sind wenige Aussagen zu Beschleunigungen enthalten. Diese widersprechen sich teilweise. Bei den Längsbeschleunigungen ist ein Einfluss von der Ausgangsgeschwindigkeit und der Geschwindigkeitsdifferenz zu vermuten. Die Größe der Querb beschleunigung hängt von der Streckencharakteristik ab.

Eine Bestimmung von Fahrertypen auf der Grundlage von gemessenen Fahrverhaltensdaten (Geschwindigkeit, Querb beschleunigung etc.) ist derzeit nicht möglich. Es gibt jedoch Untersuchungen, die einen Zusammenhang zwischen maximaler Quer- / Längsbeschleunigung und dem Fahrertyp angeben. Auf Grundlage dieses Zusammenhanges kann der Fahrertyp aus Einzelprofilen bestimmt werden. Die ermittelten Absolutwerte der Messdaten (Längs- und Querb beschleunigung) gelten jedoch nur für eine Strecke und können nicht allgemein gültig auf andere Strecken übertragen werden.

5 Ziele der eigenen Untersuchung und Methodik

5.1 Ziele der eigenen Untersuchung

Im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit soll ein Fahrerassistenzsystem entwickelt werden, welches den Fahrer bei der Wahl seiner Geschwindigkeit auf Außerortsstraßen unterstützt. Aus der vorgestellten Literatur und den Ergebnissen des Projektes S.A.N.T.O.S lassen sich folgende Aufgabenstellungen ableiten:

1. **Entwicklung geeigneter Geschwindigkeitsansätze für ein SC Fahrerassistenzsystem**

Die im S.A.N.T.O.S Projekt verwendeten Modelle zur Berechnung der Geschwindigkeit sind nur bedingt für die Umsetzung in einem Fahrerassistenzsystem geeignet. Es sind Algorithmen zu entwickeln, die folgenden speziellen Anforderungen genügen:

- Als Variablen sollen nur Größen verwendet werden, die auch in der feindigitalen Karte verfügbar sind bzw. aus dieser berechnet werden können.
- Für unterschiedliche Fahrstilwünsche müssen verschiedene Geschwindigkeitsprognosemodelle erstellt werden. Eine Unterscheidung in die Fahrstilwünsche **sportlich, normal, entspannt** hat sich im Rahmen des S.A.N.T.O.S Projektes bewährt.
- Fahrer wünschen sich in Abhängigkeit des eigenen Fahrstilwunsches eine Anpassung der Assistenzsysteme an die Umgebungsbedingungen. Dies trägt zur Erhöhung der subjektiven Sicherheit bei. Aus diesem Grund sollte ein SC System auf die Umgebungsbedingung **nass / trocken** und **hell / dunkel** reagieren.

2. **Entwicklung von Modellen zur Beschreibung des Längsverzögerungsverhaltens von Kraftfahrern**

Die unterschiedlichen Fahrertypen unterscheiden sich nicht nur in der Höhe der gefahrenen Geschwindigkeit, sondern auch durch die Wahl unterschiedlich großer Längsverzögerungen. Die Größe der Beschleunigung ist neben dem Fahrstil auch von anderen Parametern abhängig. Der Einfluss der unterschiedlichen Parameter ist zu untersuchen. Für jeden Fahrertyp ist ein Modell zur Abschätzung der gewählten Beschleunigung zu erarbeiten.

Diese Modelle bilden die Grundlage für den Empfehlungszeitpunkt des Assistenzsystems.

3. **Aufnahme geeigneter Gebiete in die feindigitale Karte**

Bisher kann das SC - System nur auf einem kleinen Rundkurs im Norden von München getestet werden. Es stehen nur ca. 10 km Strecke auf einer einbahnig zweistreifigen Außerortsstraße im untergeordneten Straßennetz zur Verfügung. Für größere Tests ist dies nicht ausreichend. Aus diesem Grund ist ein geeignetes Gebiet zur

Erprobung des SC - Systems auszuwählen. Von den Strecken ist die Geometrie zu ermitteln und in einer feindigitalen Karte abzuspeichern.

4. **Entwicklung eines Algorithmus zur automatischen Streckeneinteilung**

Derzeit existiert kein geschlossener praktikabler Algorithmus zur Unterteilung einer Strecke in Singularitäten und Abschnitte ähnlicher Streckencharakteristik. Im Hinblick auf eine vollständige Umsetzung eines SC - Systems muss diese Einteilung automatisiert erfolgen.

5. **Test des Systems**

Das SC - System ist technisch umzusetzen, dies ist im S.A.N.T.O.S - Demonstrator möglich. Eine Beeinflussung der Längsbeschleunigungsparameter ist erforderlich. Die neuen Geschwindigkeits- und Beschleunigungsprognosemodelle sind zu validieren. Erste Tendenzen über die Akzeptanz eines SC - Systems sind abzuleiten.

Um die aufgeführten Ziele erreichen zu können, wurden die nachfolgend beschriebenen Methoden verwendet.

5.2 Untersuchungsablauf

Zur Erarbeitung eines allgemein gültigen Geschwindigkeits- und Beschleunigungsmodells, erfolgten gezielt Fahrverhaltensmessungen (Kap. 5.3.1 und 5.3.2).

Die aufgenommen Messdaten wurden in drei Gruppen gegliedert (Fahrertyp sportlich, normal und entspannt). Zu jedem Fahrertyp lag eine ausreichend große Anzahl von Messdaten vor (Kap.5.4.1).

Die gemessenen Fahrverhaltensdaten wurden in Abhängigkeit vom Fahrertyp auf den Einfluss unterschiedlicher Parameter (Geometrie, Umgebungsbedingungen etc.) ausgewertet. Im Anschluss daran erfolgte eine Modellbildung für das Geschwindigkeits- und Längsverzögerungsverhalten (Kap.6).

Um ein möglichst homogenes und an das Fahrverhalten angepasstes Geschwindigkeitsverhalten zu prognostizieren, darf sich die empfohlene Geschwindigkeit nicht bei jedem Lageplanelement ändern. Dies konnte dadurch erreicht werden, dass die Strecke in Abschnitte ähnlicher Streckencharakteristik und Singularitäten untergliedert wurde (Abschnittseinteilung, Kap.7.2).

Für Testfahrten und zur Vorbereitung von Probandenfahrten wurde ein Gebiet im Raum Sachsen in die feindigitale Karte aufgenommen (Kap. 7.1).

Durch Probandenfahrten erfolgte eine erste Validierung der entwickelten Modelle. Dabei wurden unterschiedliche MMI Varianten dargestellt und beurteilt (Kap. 7.3).

In Abbildung 27 ist der gesamte Untersuchungsablauf dargestellt.

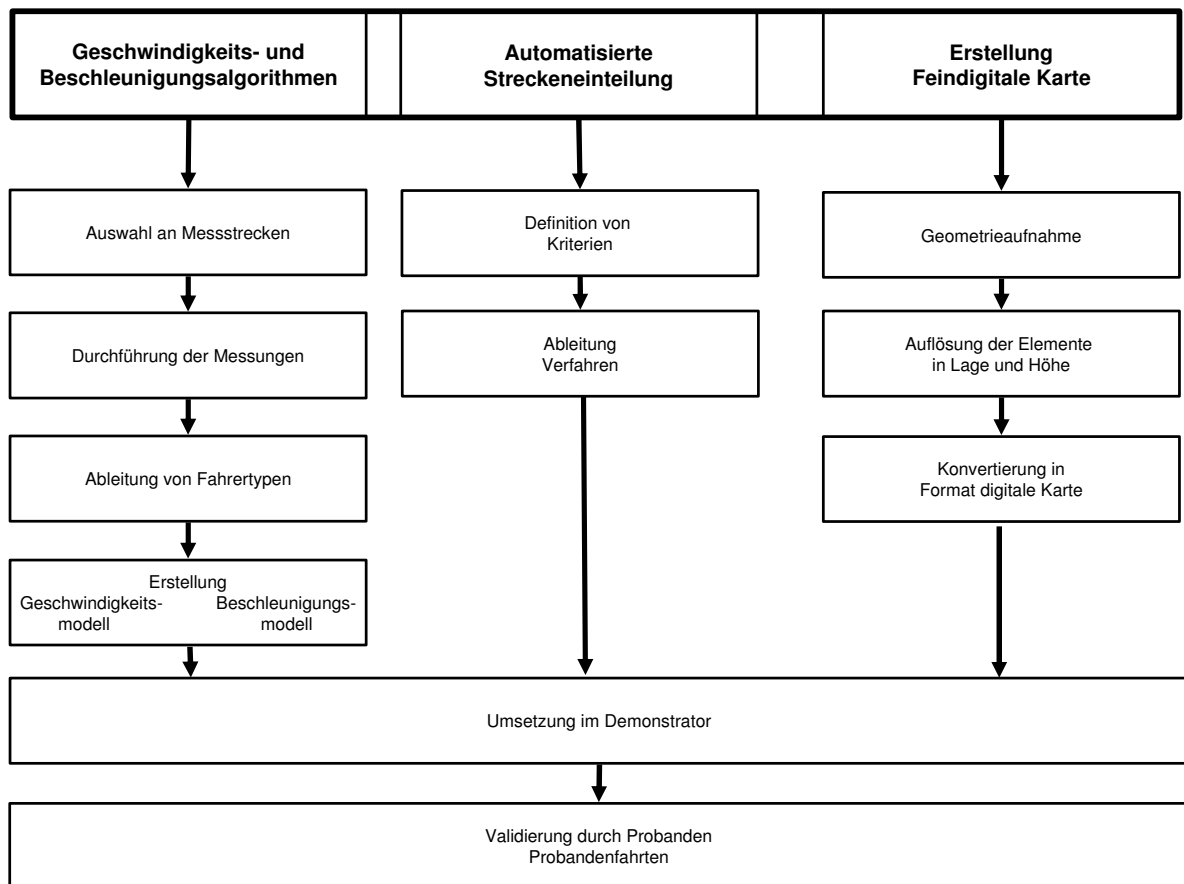


Abb. 27: Untersuchungsablauf zur Weiterentwicklung des SC - Systems

5.3 Datenaufnahme

5.3.1 Auswahl und Aufnahme von Messstrecken

Zur Ableitung der Modelle mussten Geschwindigkeitsmessungen erfolgen. Auf Grund des Untersuchungszieles (Unterstützung des Fahrers bei der Wahl seiner Geschwindigkeit auf kritischen Außerortstrecken) wurden nur einbahnig zweistreife Außerortsstraßen ausgewählt. Die Messstrecken mussten repräsentativ für das gesamte Außerortsstraßennetz sein. Aus diesem Grund fanden auch Messungen im untergeordneten Straßennetz (Staats- und Kreisstraßen mit geringem Ausbaustandard) statt. Die Fahrbahnbreite sollte aber so groß sein ($B > 5,50$ m), dass die Beeinflussung durch entgegenkommende Pkw gering ist. Weiterhin wurden folgende Bedingungen an die Messstrecken gestellt:

- Die Fahrbahnoberfläche musste in einem guten Zustand sein, um eine Beeinflussung des Fahrverhaltens auszuschließen.
- Die Strecke musste eine ausreichende Länge besitzen, so dass eine freie Geschwindigkeitsentwicklung möglich war. Zusätzlichen Geschwindigkeitsbeschränkungen (ne-

ben der gesetzlich zulässigen Höchstgeschwindigkeit auf Außerortsstraßen) durften ebenfalls nicht vorhanden sein.

In der Tabelle 4 sind alle Messstrecken aufgelistet. Messungen erfolgten auf ca. 50 km Außerortsstraßen. Die Geschwindigkeitsmessungen fanden in den Jahren 2000/2001 und 2002 statt.

Nr.	Bezeichnung	Länge
1	B 92 Oelsnitz - Adorf	2,4 km
2	B 101 Großschirma - Kleinwaltersdorf	3,0 km
3	B 173 Niederschöna - Naundorf	2,2 km
4	B 282 Syrau - Mehltheuer	2,1 km
5	S 119 Neudiehmen - Neukirch	1,4 km
6	S 119 Weißnauslitz - Neudiehmen	1,1 km
7	S 154 Langburkersdorf - Abzweig Hohwaldklinik	3,6 km
8	S 154 Abfahrt Steinbruch - Langburkersdorf	2,8 km
9	S 160 Wilschdorf - Neudörfel	3,0 km
10	S 178 Schlottwitz - Mühlbach	5,2 km
11	S 183 Reinhardtsgrimma - Niederfrauendorf	2,9 km
12	S 190 Reichstädt - Ruppendorf	2,7 km
13	S 194 Hartha - Grillenburg	2,7 km
14	S 194 Grillenburg - Naundorf	4,5 km
15	S 238 Niederwiesa - Lichtenwalde	1,7 km
16	S 83 Lotzbach - Biberbach	2,1 km
17	S 81 Haimhausen - Ampermoching	1,6 km
18	K 9022 Cunnersdorf - Abzweig Luchau	2,3 km
19	K 9022 Cunnersdorf - Reinhardtsgrimma	2,7 km

Tab. 4: Verwendete Messstrecken

Von einem Großteil der Strecken lag eine terrestrische Vermessung vor. Von einigen Strecken wurde die Geometrie des Lageplanes mit Hilfe einer kinematischen Vermessung (Weise u.a. 2003) aufgenommen. Aus den vorhandenen bzw. aufgenommenen Daten wurde die Achse ermittelt. Die ermittelten Elementfolgen der aufgenommen Strecken entsprachen nicht immer den heutigen Anforderungen des Straßenentwurfes (z. B. Korbbögen). Bedingt durch bauliche Veränderungen und die historisch entstandenen Linienführungen konnte nur eine Annäherung an die klassischen Elemente erfolgen. Die Achse wurde so nachtrassiert, dass eine Auswertung der Geschwindigkeit in Abhängigkeit der Geometrie möglich war. Dies bedeutete:

- es gibt keine Elemente mit geringen Elementlängen (z. B. Radienlängen von 5 m),
- die Beschreibung einer Kurve erfolgt vorzugsweise durch 3 Elemente (Klothoide, Kreisbogen, Klothoide) oder durch Korbbögen,

- Elementfolgen werden zu Wendelinien bzw. Eilinen zusammen gefasst.

Die abgeleitete Achse sollte den o.g. Anforderungen entsprechen und sich trotzdem mit der Punktfolge der aufgemessenen Mittellinie weitgehend decken oder einen sehr geringen Abstand aufweisen. Diese beiden Forderungen widersprechen sich häufig, so dass eine iterative Annäherung und Optimierung notwendig war.

5.3.2 Erfassung des Fahrverhaltens

Die Messung des Fahrverhaltens von unbehindert fahrenden Pkw ist mit Hilfe von:

- Verfolgungsfahrten,
- Probandenfahrten oder
- Querschnittsmessungen

möglich. Bei Probandenfahrten befahren Testpersonen mit einem Messfahrzeug die Teststrecke. Während der Fahrt werden die gefahrenen Geschwindigkeiten und Beschleunigungen aufgezeichnet. Bei dieser Methode kann über einen Fragebogen eine psychologische Beurteilung erfolgen. Nachteil dieser Methode ist, dass die Probanden sich in einem ungewohnten Fahrzeug befinden (Messfahrzeug) und Kenntnis davon haben, dass ihre Fahrdaten aufgezeichnet werden und sich aus diesem Grund ihr Fahrverhalten ändern kann. Aus diesem Grund muss eine lange Eingewöhnungsfahrt stattfinden. Desweiteren sind diese Fahrten mit einem hohen zeitlichen und finanziellen Aufwand verbunden. Deshalb wurde im Rahmen dieser Arbeit das Geschwindigkeitsverhalten durch Verfolgungsfahrten ermittelt (Kap. 5.3.2.1).

5.3.2.1 Verfolgungsfahrten

Bei Verfolgungsfahrten wird das Fahrverhalten einzelner, unbehindert fahrender und zufällig ausgewählter Pkw Fahrer über den gesamten Verlauf der Strecke erfasst. Diese Methode lässt sich wie folgt charakterisieren:

- Es kann ein repräsentatives Kollektiv von Fahrern erfasst werden.
- Der verfolgte Fahrer fährt unbeeinflusst, da er keine Kenntnis von der durchgeführten Messung besitzt.

Bei der Durchführung muss das Messfahrzeug einen zeitlich konstanten Abstand zum verfolgten Fahrzeug einhalten. Um ein fahrer- und fahrzeugtypisches Abstandsverhalten auszuschließen, wurden alle Fahrten von einem erfahrenen Laboringenieur durchgeführt. Im Messfahrzeug wurden über Sensoren die Geschwindigkeit und Querschleunigung erfasst. Die Stationszuordnung erfolgte durch speziell angebrachte Messmarker am Leitpfosten. Verfolgungsfahrten sind für die Ermittlung des Geschwindigkeitsverhaltens bei Nacht nicht geeignet, da die Scheinwerfer des Messfahrzeuges den Fahrer des verfolgten

Fahrzeuges blenden und damit eine höhere Geschwindigkeit provozieren. Auf allen Strecken, die in Tab. 4 (Kap. 5.3.1) aufgelistet sind, wurden Verfolgungsfahrten durchgeführt. Je Richtung erfolgten mindestens 30 Fahrten. Es lagen nach Abschluss der Messungen über 1200 Einzelprofile vor.

5.3.2.2 Querschnittsmessungen

Mit Querschnittsmessungen kann die Geschwindigkeit an einer bestimmten Stelle in sehr großer Anzahl bestimmt werden. Im Rahmen dieser Untersuchung wurden Querschnittsmessungen durchgeführt, um:

- die statistische Absicherung der Verfolgungsfahrten durch Prüfung auf gleiche Grundgesamtheit mit dem Kolmogoroff - Smirnov - Zweistichproben - Anpassungstests zu erhalten und
- das Fahrverhalten bei Regen und Nacht zu analysieren, da eine Ermittlung durch Verfolgungsfahrten aus methodischen Gründen nicht möglich ist (siehe Kap. 5.3.2.1).

Es wurden an 15 Messquerschnitten der folgenden Strecken zusätzlich zu den Verfolgungsfahrten Querschnittsmessungen durchgeführt:

- S194 Hartha - Grillenburg und
- S194 Grillenburg Naundorf.

Die beiden Strecken besitzen unterschiedliche Streckencharakteristiken. Die Wahl der Messquerschnitte erfolgte so, dass Messungen in Singularitäten und Abschnitten ähnlicher Streckencharakteristik erfolgten. Im Bereich von Singularitäten wurden die Annäherungsgeschwindigkeit und die minimale Kurvengeschwindigkeit gemessen. An jedem Messquerschnitt wurden mindestens:

- 150 Messungen bei Tag / Trocken,
- 50 Messungen bei Nacht / Trocken und
- 50 Messungen bei Tag / Regen

durchgeführt. Die 150 Messungen dienten ebenfalls der statistischen Absicherung der durchgeführten Verfolgungsfahrten (Probe auf gleiche Grundgesamtheit). Die Nullhypothese (beide Stichproben entstammen der gleichen Grundgesamtheit) konnte bei den Messungen bestätigt werden. Die Tests wurden mit einem Sicherheitsniveau von 5% ($\alpha = 0,05$) durchgeführt. Die genauen Ergebnisse sind in Anlage 2 enthalten.

5.4 Methoden der Datenauswertung

5.4.1 Fahrertypisierung aus Einzelprofilen

Ziel war es, für drei verschiedene Fahrertypen (**sportlich, normal, entspannt**) Geschwindigkeitsprognosemodelle zu entwickeln. Zur Typisierung standen nur die Messdaten aus den Verfolgungsfahrten und Querschnittsmessungen zur Verfügung (Kap. 5.3.2). In Anlehnung an die Untersuchung von Marstaller u.a. (2001) wurden folgende Annahmen zur Ableitung von Fahrertypen aus Geschwindigkeits- und Beschleunigungsprofilen im Einzelprofil getroffen:

Fahrertypen unterscheiden sich nach:

1. der auftretenden maximalen Querb beschleunigung,
2. auftretenden Längsverzögerung /-beschleunigung sowie
3. der Summe der Geschwindigkeitsänderungen (kumulierte Geschwindigkeitsänderung)

beim Durchfahren eines Streckenabschnittes. In Abb. 28 sind das Längsbeschleunigungsprofil, das Querb beschleunigungsprofil und das Geschwindigkeitsprofil von zwei unterschiedlichen Fahrern dargestellt. Diese Profile wurden durch Verfolgungsfahrten aufgezeichnet. Zu erkennen ist, dass bei Fahrer 1 (schwarze Linien in Abb. 28) deutlich geringe Geschwindigkeiten, Querb beschleunigungen und Längsbeschleunigungen als bei Fahrer 2 (grüne Linien in Abb. 28) gemessen wurden. Die gleiche Tendenz ist bei den Längsbeschleunigungen zu beobachten. Bei Betrachtung dieser Messgrößen ist zu beachten, dass diese auf Grund der gewählten Messmethode (Verfolgungsfahrten) nicht den tatsächlich vom „verfolgten“ Fahrer gewählten Längsbeschleunigungen entsprechen. Während der Verfolgungsfahrt hält das nachfahrende Fahrzeug einen zeitlich konstanten Abstand zum voraus fahrenden ein. Der Beginn und das Ende eines Bremsvorganges kann nicht exakt gemessen werden. Wegen der großen Stichprobe (922 Einzelprofile) ist eine Ableitung von Tendenzen jedoch möglich und zulässig. In Tab. 5 sind für die in Abb. 28 dargestellten zwei Einzelprofile die fahrertypischen Daten maximale Querb beschleunigung (a_R), die maximale Längsverzögerung ($-a_L$), die maximale Längsbeschleunigung ($+a_L$) und die kumulative Geschwindigkeitsänderung (V_{kum}) dargestellt. Ersichtlich ist, dass bei Fahrer 2 höhere Beschleunigungen gemessen wurden als bei Fahrer 1. Die subjektive Einschätzung, dass Fahrer 2 eine sportlichere Fahrweise als Fahrer 1 hat, ist auch anhand der berechneten fahrertypischen Daten quantitativ nachweisbar.

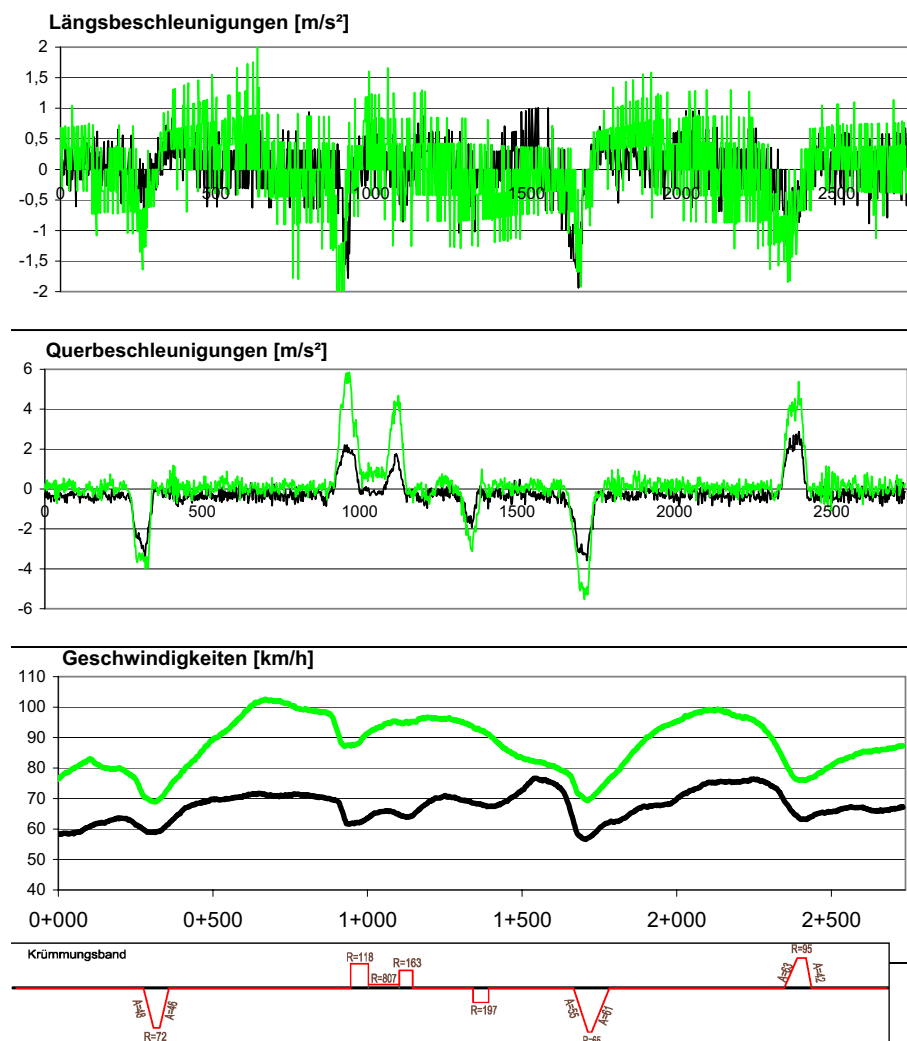


Abb. 28: Geschwindigkeits- und Beschleunigungsprofil für zwei verschiedene Fahrer

	Fahrer 1	Fahrer 2
	scharze Linien in Abb. 28	grüne Linien in Abb. 28
maximale Querbeschleunigung [m/s^2]	3,84	5,96
maximale Verzögerung [m/s^2]	-1,81	-2,09
maximale Beschleunigung [m/s^2]	1,93	3,37
kumulierte Geschwindigkeitsänderung [km/h]	218	337

Tab. 5: Kennwerte für die Fahrertypisierung von zwei Geschwindigkeitsprofilen

Zu jeder Strecke lagen mindestens 30 gemessene Einzelprofile je Richtung vor. Für jedes dieser Profile wurden die fahrertypischen Kennwerte berechnet. In Abb. 29 sind für zwei Streckenabschnitte die Verteilung des Kennwertes maximale Querbeschleunigung für alle Einzelprofile dargestellt. Die beiden Strecken unterscheiden sich in Ihrer Charakteristik deutlich voneinander. Bei der Strecke B101 handelt es sich um eine großzügig trassierte Bundesstraße im Erzgebirgsvorland. Die Straße S194 ist eine relativ eng trassierte Straße zur Erschließung eines größeren Ortes im Erzgebirge. Für die Strecke S 194 (blau in Abb. 29) betragen die Werte zwischen $2,5 \text{ m/s}^2$ und $7,0 \text{ m/s}^2$. Die meisten Fahrer (25) auf der Strecke 1, S 194 wählten eine maximale Querbeschleunigung zwischen 4 m/s^2 und $5,5 \text{ m/s}^2$, fünf Fahrer wählten eine größere und fünf Fahrer eine geringere Querbeschleunigung. Auf der zweiten Strecke (B101, braun in Abb.29) wurden Querbeschleunigungen zwischen $1,5 \text{ m/s}^2$ und 4 m/s^2 gemessen. Auf diesem Streckenabschnitt wurde bei den meisten Fahrern eine maximale Querbeschleunigung zwischen $2,5 \text{ m/s}^2$ und $3,5 \text{ m/s}^2$ gemessen.

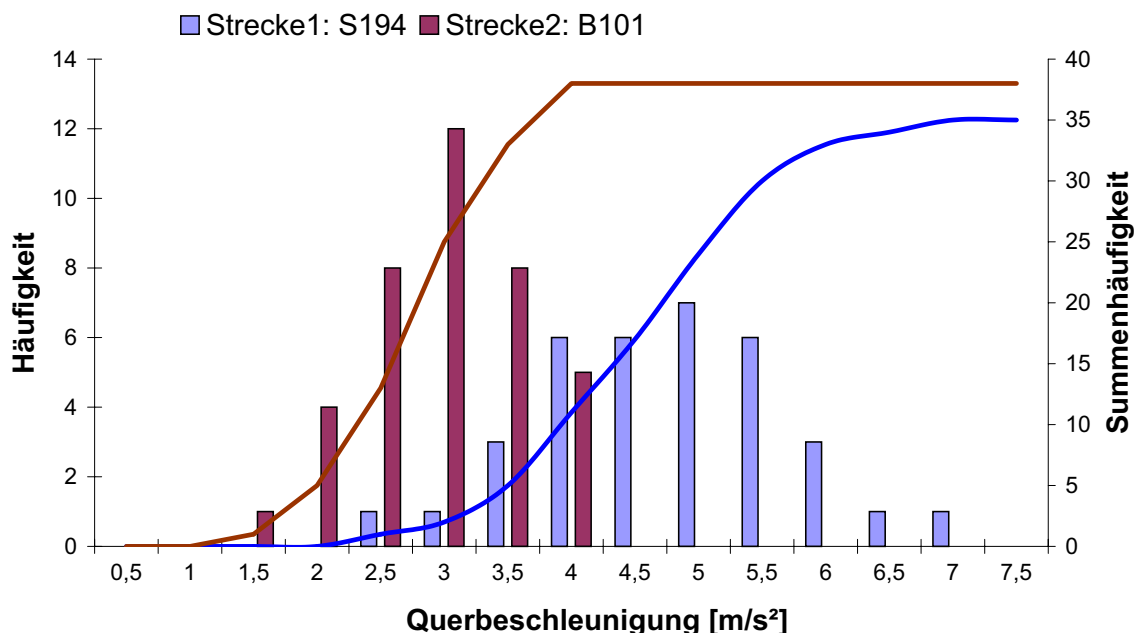


Abb. 29: Verteilung der berechneten maximalen Querbeschleunigung für alle Einzelprofile für zwei Streckenabschnitte

Dies bedeutet, dass die Größe der Querbeschleunigung auch von der Streckencharakteristik abhängt. Eine Gruppierung der Profile anhand von diskreten Werten ist somit nicht möglich. Bei den Kennwerten Längsbeschleunigung, Längsverzögerung und kumulierte Geschwindigkeitsänderungen treffen die Aussagen in gleicher Weise zu. Um dennoch eine Gruppierung vornehmen zu können, erfolgte die Berechnung der relativen Häufigkeit zu jedem Kennwert und Streckenabschnitt. Für die beiden betrachteten Streckenabschnitte ist dies in Abb. 30 dargestellt. Von diesen Funktionen lassen sich die statistischen Größen:

- Mittelwert \bar{X} und
- Standardabweichung σ

berechnen.

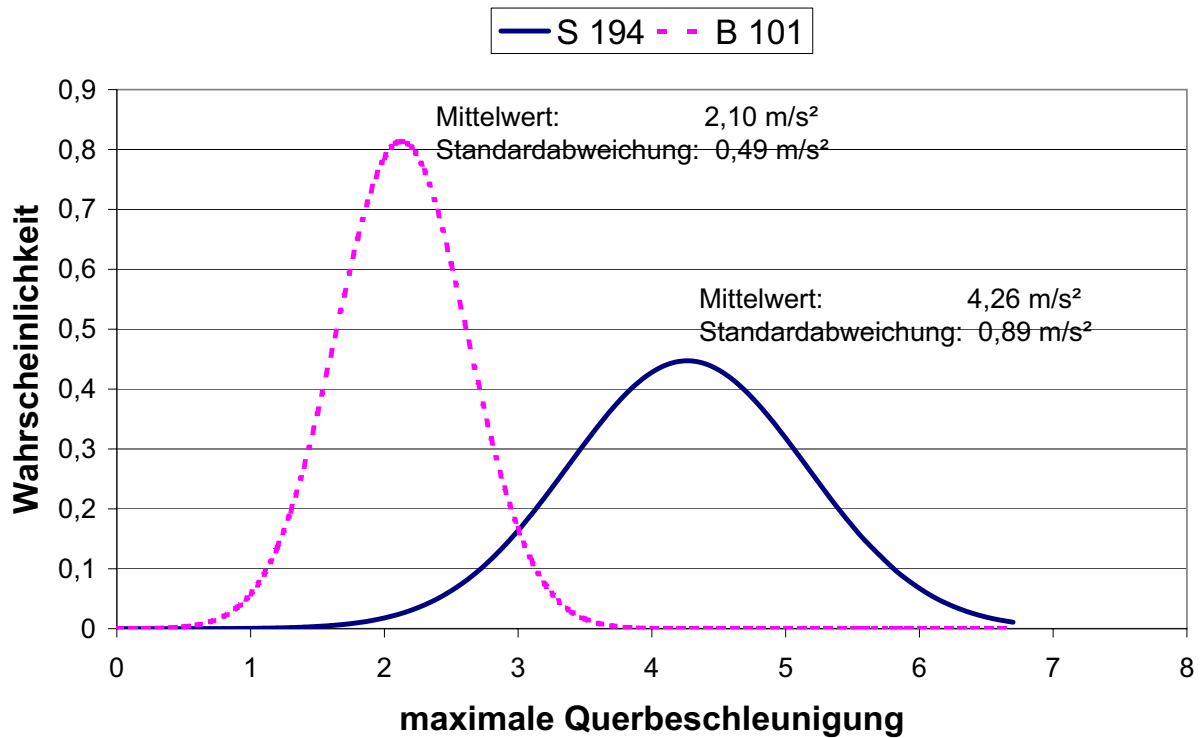


Abb. 30: Verteilungsfunktionen für die maximale Querbeschleunigung für zwei ausgewählte Strecken

Die Fahrertypisierung wurde wie folgt vorgenommen:

- **sportlich:** $Kennwert > \bar{X} + \sigma$
- **normal:** $\bar{X} < Kennwert \leq \bar{X} + \sigma$
- **entspannt:** $Kennwert \leq \bar{X}$

Auf Grund dieser Definition konnte jedes Einzelprofil einem Fahrertyp zugeordnet werden.

5.4.2 Auswertung der Geschwindigkeitsmessungen - Verfolgungsfahrten

Das Fahrverhalten von Einzelfahrern ist unterschiedlich. Die Geschwindigkeiten variieren stark, vor allem im Bereich von Geraden (Abb. 31). Das unterschiedliche Geschwindigkeitsverhalten soll durch den Fahrstilwunsch berücksichtigt werden. Das Regelwerk des Straßenentwurfs bemisst sicherheitsrelevante Größen nach der Geschwindigkeit V_{85} . Bei der statistischen Berechnung dieser Geschwindigkeit werden an jeder Station die Verteilung und anschließend ein Quantilswert aus den Messdaten bestimmt. Dies hat zur Folge, dass diese Geschwindigkeitskurve immer eine obere Hüllkurve darstellt. Das Fahrverhalten der einzelnen Kraftfahrer lässt sich nicht durchgängig mit einer Quantilsgeschwindigkeit beschreiben. Ein Kraftfahrer (z. B. Fahrer 3 in Abb. 31) fährt nicht in allen Bereichen eine hohe Geschwindigkeit. In Singularitäten (Station 0+700 und 2+600) ist bei diesem Fahrer eine mittlere Geschwindigkeit zu beobachten. Bei der Empfehlung einer Quantilsgeschwindigkeit innerhalb eines Assistenzsystems (z. B. V_{85}) würde dies dazu führen, dass in Singularitäten eine zu hohe Geschwindigkeit und in Abschnitten ähnlicher Streckencharakteristik eine zu niedrige Geschwindigkeit berechnet wird.

Als Grundlage zur Modellbildung wurde aus diesem Grund jedes Einzelprofil betrachtet. Es erfolgte eine Typisierung des Fahrers nach dem unter Kap. 5.4.1 beschriebenen Verfahren. Zu jedem definiertem Fahrertyp (sportlich, normal und entspannt) lagen nun zugeordnete Einzelprofile zur Auswertung vor. Das Geschwindigkeitsverhalten des Kraftfahrers wird neben der Streckengeometrie auch durch andere Faktoren beeinflusst (z. B. Geschwindigkeitsbegrenzungen). Für die Erstellung der Modelle waren nur die Bereiche relevant, in denen der Kraftfahrer seine Geschwindigkeit frei auf Grund der Streckencharakteristik wählen konnte. Dabei war zu unterscheiden in Singularitäten und Abschnitte ähnlicher Streckencharakteristik (siehe Kap. 2). In Abb. 32 ist das Geschwindigkeitsprofil eines Fahrers dargestellt. Es können Bereiche definiert werden, in denen die Geschwindigkeit durch die Streckengeometrie beeinflusst wird.

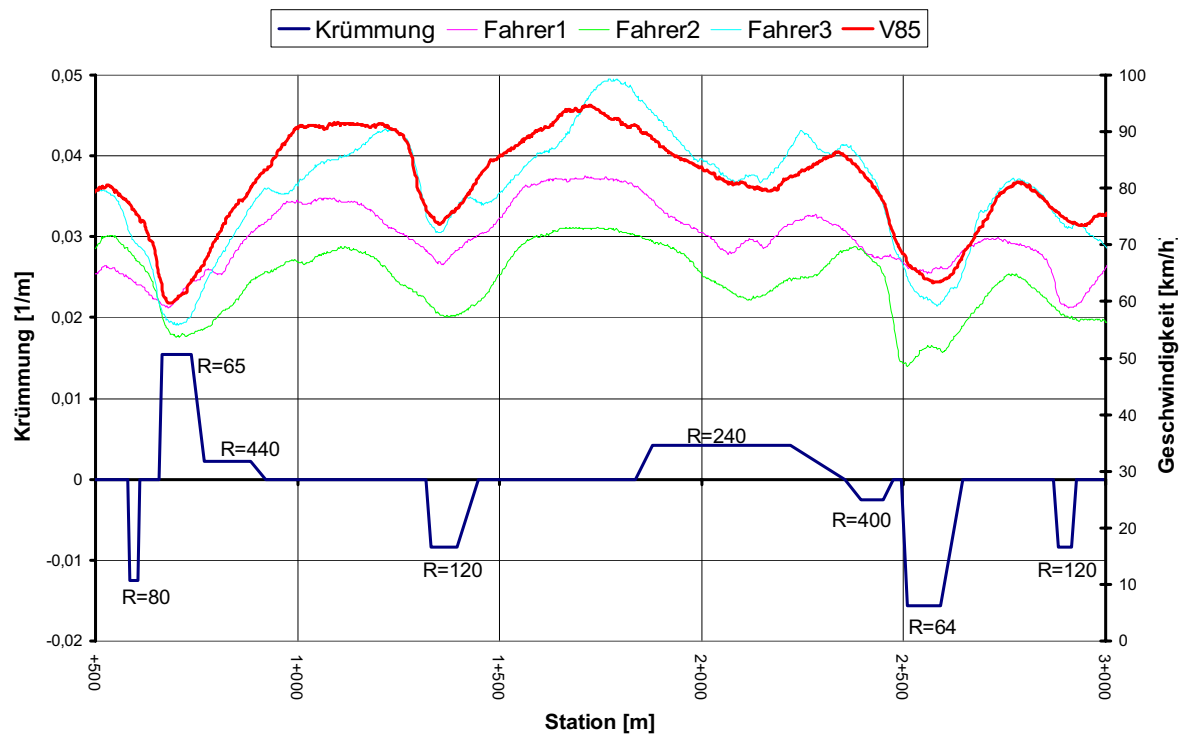


Abb. 31: Gemessene Geschwindigkeitsprofile

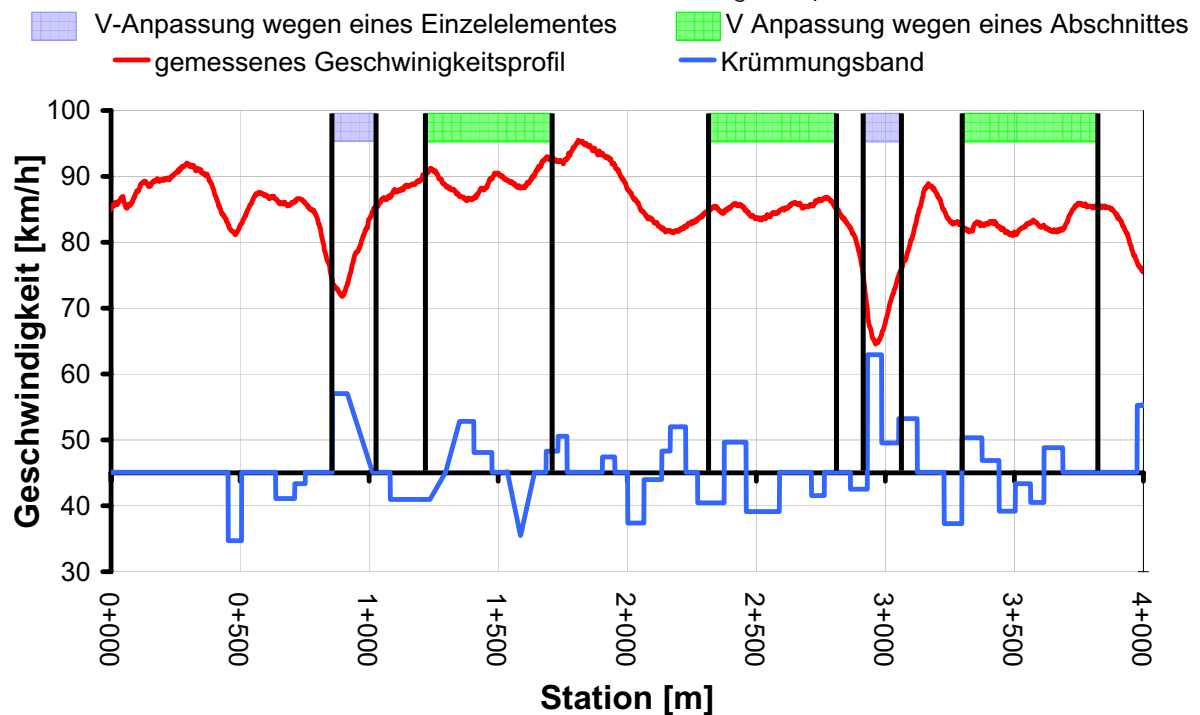


Abb. 32: Durch die Streckencharakteristik beeinflusste maßgebende Geschwindigkeiten

Dies ist dann der Fall, wenn:

- der Fahrer seine Geschwindigkeit wegen eines Einzelelementes deutlich reduziert (blaue Bereiche in Abb. 32) oder
- der Fahrer über einen Streckenabschnitt eine nahezu konstante Geschwindigkeit fährt, welche geringer als die gesetzlich zulässige Höchstgeschwindigkeit ist (grüne Bereiche in Abb. 32).

Dies bedeutet, in den blauen Abschnitten wird die Geschwindigkeit nur durch die Geometrie eines Einzelelementes beeinflusst. Die Geometrie dieses Abschnittes und das Geschwindigkeitsverhalten sind für die Modell der Singularitäten auszuwerten. Innerhalb eines grünen Bereiches ist eine ähnliche Streckencharakteristik vorhanden und somit ist die Geschwindigkeit nahezu konstant. Dieser Bereich ist für die Modellbildung der Abschnitte ähnlicher Streckencharakteristik relevant. Für jedes Geschwindigkeitsprofil können diese Abschnitte gebildet werden. Die Länge und Anzahl der Abschnitte sind bei jedem Profil unterschiedlich. Eine manuelle Festlegung dieser Bereiche war auf Grund der großen Datenmenge nicht möglich. Alle Geschwindigkeitsprofile lagen in einem Datenbanksystem vor und konnten mit Hilfe von Algorithmen ausgewertet werden. Die Definition der Abschnitte erfolgte in Anlehnung an Lippold (1997) nach folgenden Kriterien:

- Eine Singularität liegt dann vor, wenn der Einzelfahrer vor einem Element seine Geschwindigkeit um mehr als 10 km/h vermindert und nach dem Element die Geschwindigkeit wieder erhöht (grüne Bereiche der Abb. 33) oder beim Durchfahren eines Einzelelementes eine Querschleunigung größer $2m/s$ gemessen wurde (gelbe Bereiche der Abb. 33).
- Ein Abschnitt ähnlicher Streckencharakteristik liegt dann vor, wenn die Geschwindigkeit um weniger als 10 km/h in einem mindestens 200 m langen Abschnitt variiert. Innerhalb dieses Abschnittes darf die Querschleunigung einen Wert von $2m/s$ nicht überschreiten (blaue Bereiche der Abb. 33).

Durch diese Einteilung konnte für die Modellbildung das Geschwindigkeitsverhalten in Abhängigkeit von der Geometrie für die weitere Auswertung berechnet werden. Dabei wurden die definierten Fahrertypen beachtet.

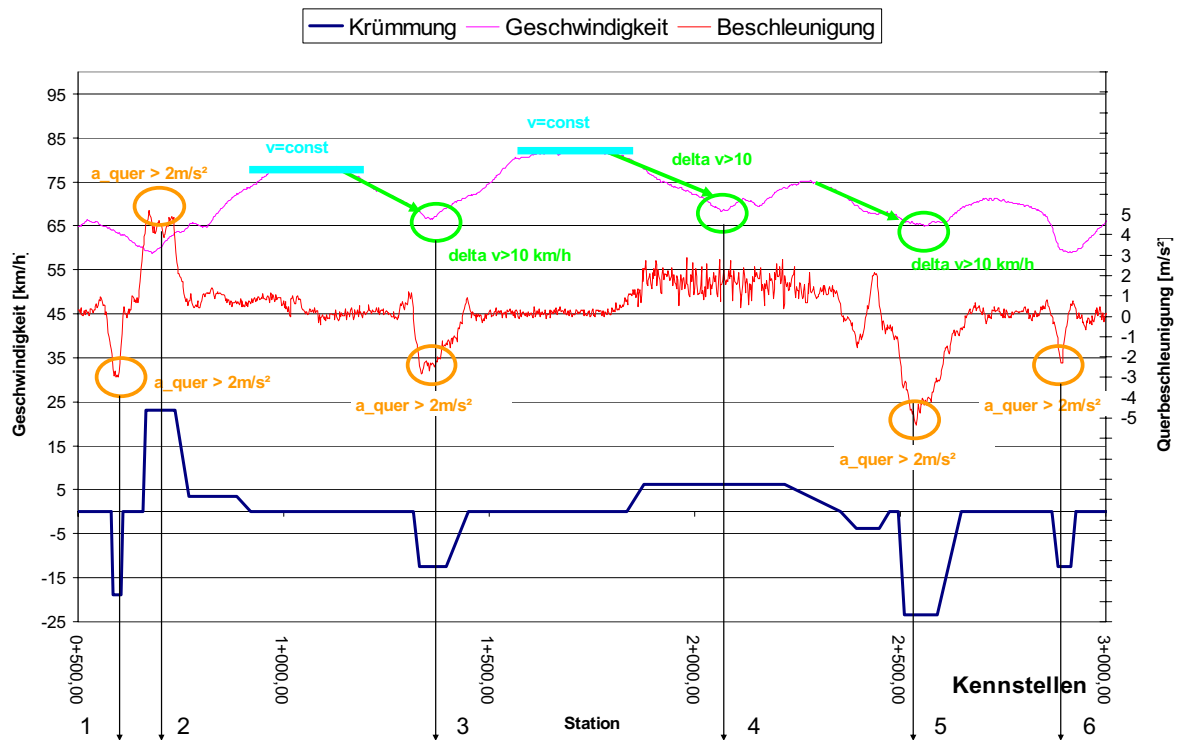


Abb. 33: Definition charakteristischer Geschwindigkeiten

5.4.3 Auswertung der Geschwindigkeitsmessungen - Querschnittsmessungen

An den definierten Querschnitten (siehe Kap. 5.3.2.2) wurden die Verteilungsfunktionen für die unterschiedlichen Witterungsbedingungen bestimmt. Eine Fahrertypisierung nach Kap. 5.4.1 ist nicht möglich, da die Kennwerte (Längsbeschleunigung, Querschleunigung etc.) an einem Einzelquerschnitt nicht zur Verfügung standen. Es erfolgte eine Zuordnung über folgende Näherung:

- sportlicher Fahrstil: V_{85} Quantil,
- normaler Fahrstil: V_{70} Quantil und
- entspannter Fahrstil: V_{50} Quantil.

Im S.A.N.T.O.S Projekt (König u.a. 2002) und Patzak (2002) wurde nachgewiesen, dass diese Zuordnung eine gute Näherung darstellt. Dies entspricht den Mittelwerten der Fahrertypisierung nach Kap. 5.4.1.

5.5 Zusammenfassung

Entsprechend der Zielstellung sollte aus Messdaten ein Geschwindigkeitsprognose- und Längsverzögerungsprognosemodell für ein Fahrerassistenzsystem entwickelt werden. Dafür wurden gezielt Messstrecken ausgewählt. Als Messmethodik wurden Verfolgungsfahrten durchgeführt (Kap. 5.3.2). Zur statistischen Absicherung und zur Untersuchung von Einflüssen aus den Umgebungsbedingungen wurden Querschnittsmessungen durchgeführt.

Diese Daten wurden entsprechend der Zielstellung in die drei Gruppen (Fahrertypen):

- sportlich,
- normal und
- entspannt

aufgeteilt. Für die Auswertung der gemessenen Einzelprofile wurde ein Verfahren entwickelt, das es erlaubt, die Daten gezielt nach den Bereichen Singularitäten und Abschnitte ähnlicher Streckencharakteristik auszuwerten. Die unterschiedlichen Fahrertypen wurden berücksichtigt. Das Verfahren zur Bestimmung des Fahrertyps basierte im Gegensatz zu den früher verwendeten Verfahren nur auf quantitativen Werten. Ein Fragebogen war somit nicht erforderlich.

Durch diese Gruppenbildung war es möglich, gezielt Geschwindigkeitsprognosealgorithmen mit den Anforderungen eines Fahrerassistenzsystems zu entwickeln. Unterschiedliche Fahrertypen konnten berücksichtigt werden. Der Vorteil der gewählten Methodik zu den bisher bekannten Prognosemodellen aus dem Bereich des Straßenentwurfs bestand darin, dass nicht an jeder Stelle ein bestimmtes Verhalten aus verschiedenen Fahrern bewertet wird. Es wurde vielmehr das Fahrverhalten eines Einzelnen über einen längeren Streckenabschnitt bewertet.

Im nachfolgenden Kapitel werden die Ergebnisse vorgestellt.

6 Darstellung und Interpretation der Ergebnisse

6.1 Fahrertypisierung

Es wurden insgesamt 922 verschiedene Einzelprofile von unbehindert fahrenden Pkw erfasst und ausgewertet. Zu jedem Profil wurden die in Kap. 5.4.1 definierten Kennwerte zur Fahrertypisierung ermittelt. Es erfolgte eine Zuordnung zu den Fahrertypen sportlich, normal und entspannt. In Abb. 34 ist die aus den Messdaten ermittelte Verteilung der Fahrertypen in Bezug auf die unterschiedlichen Bewertungskriterien dargestellt.

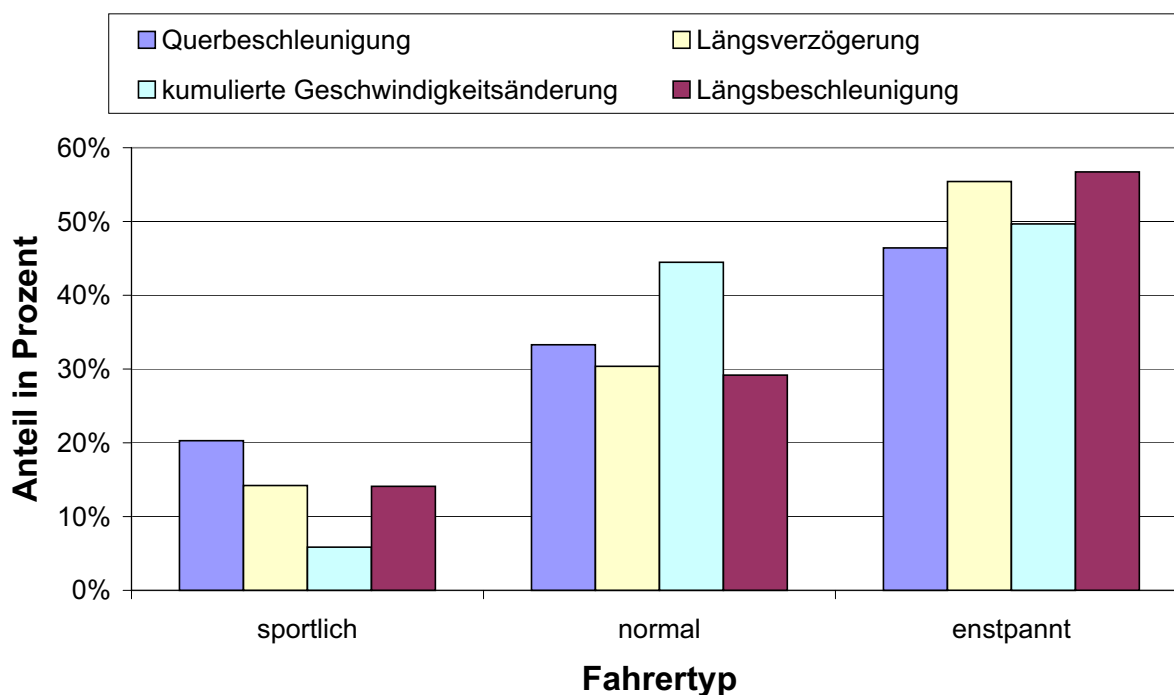


Abb. 34: Verteilung der aus den Einzelprofilen ermittelten Fahrertypen in Abhängigkeit von verschiedenen Kennwerten

Es ist zu erkennen, dass sich nur in sehr wenigen Fällen der Fahrertyp in Abhängigkeit vom Bewertungskriterium ändert.

Um eine Bewertung der Gruppierung vornehmen zu können, wurde aus den Daten der Zusammenhang zwischen Radius und Geschwindigkeit für jeden Fahrertyp ermittelt. Es wurde folgender Regressionsansatz (vgl. Patzak 2002, Sosouhmihen 2001) gewählt:

$$V = a \cdot \ln(R) + b \quad (12)$$

V Geschwindigkeit [km/h]

R Radius [m]

a,b Regressionskoeffizienten

In der Tab. 6 ist der ermittelte Zusammenhang dargestellt. Für das Kriterium kumulative Geschwindigkeitsänderung konnte für den Fahrertyp sportlich keine sinnvollen Regressionsfunktion ermittelt werden (Tab. 6). Aus diesem Grund erfolgen keine weiteren Betrachtungen zu diesem Kriterium. Für die Kennwerte maximale Querbeschleunigung (a_R), maximale Längsbeschleunigung ($+a_L$) und maximale Längsverzögerung ($-a_L$) sind die ermittelten Regressionsfunktionen in den Abb. 35 bis 37 dargestellt. Ersichtlich ist, dass sich die Fahrertypen gut von einander abgrenzen. Somit sind alle drei Kriterien für eine Fahrertypisierung geeignet. Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Gruppierung in Fahrertypen nach dem Kriterium maximale Querbeschleunigung (a_R) verwendet. Dies ist mit der gewählten Methode zur Datenerhebung (Verfolgungsfahrten, Kap.5.3.2.1 und 5.4.1) zu begründen. Aus diesem Grund ist die Genauigkeit der Ergebnisse aus den Messdaten gegenüber den Ergebnissen aus den Daten der Querbeschleunigungen geringer einzustufen.

	sportlich	normal	entspannt
a_R	$V = 17,39 \cdot \ln(R) - 5,3$ ($R^2 = 0,44$)	$V = 16,15 \cdot \ln(R) - 7,2$ ($R^2 = 0,47$)	$V = 14,52 \cdot \ln(R) - 5,0$ ($R^2 = 0,50$)
$+a_L$	$V = 18,31 \cdot \ln(R) - 12,5$ ($R^2 = 0,47$)	$V = 17,59 \cdot \ln(R) - 12,2$ ($R^2 = 0,47$)	$V = 16,38 \cdot \ln(R) - 12,4$ ($R^2 = 0,48$)
$-a_L$	$V = 18,26 \cdot \ln(R) - 13,4$ ($R^2 = 0,41$)	$V = 16,17 \cdot \ln(R) - 7,2$ ($R^2 = 0,44$)	$V = 15,54 \cdot \ln(R) - 7,7$ ($R^2 = 0,40$)
V_{kum}	$V = 9,94 \cdot \ln(R) + 26,3$ ($R^2 = 0,02$)	$V = 16,59 \cdot \ln(R) - 6,5$ ($R^2 = 0,47$)	$V = 14,38 \cdot \ln(R) - 5,0$ ($R^2 = 0,50$)

a_R : Bewertungskriterium maximale Querbeschleunigung

$+a_L$: Bewertungskriterium maximale Längsbeschleunigung

$-a_L$: Bewertungskriterium maximale Längsverzögerung

V_{kum} : Bewertungskriterium kumulierte Geschwindigkeitsänderung

V : Geschwindigkeit [km/h]

R : Radius [m]

Tab. 6: Ermittelte Regressionsfunktionen für den Zusammenhang Radius und Geschwindigkeit für jeden Fahrertyp in Abhängigkeit verschiedener Kennwerte zur Fahrertypisierung

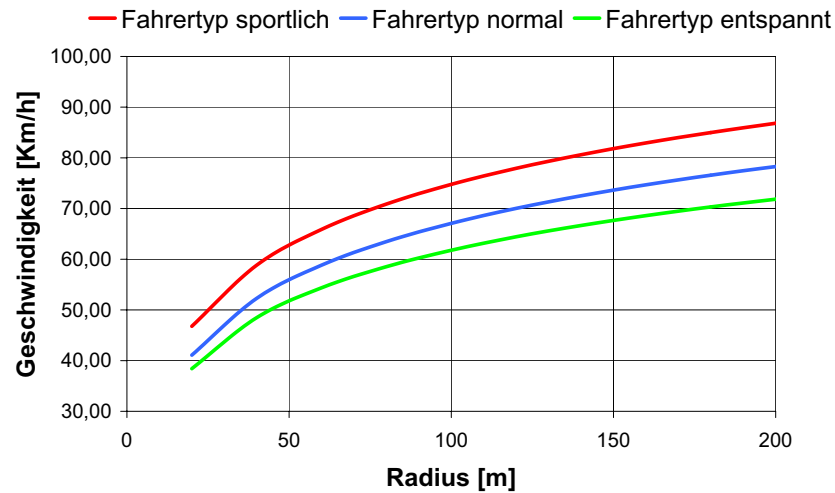


Abb. 35: Zusammenhang Radius - Geschwindigkeit für das Kriterium maximale Querbesehleunigung

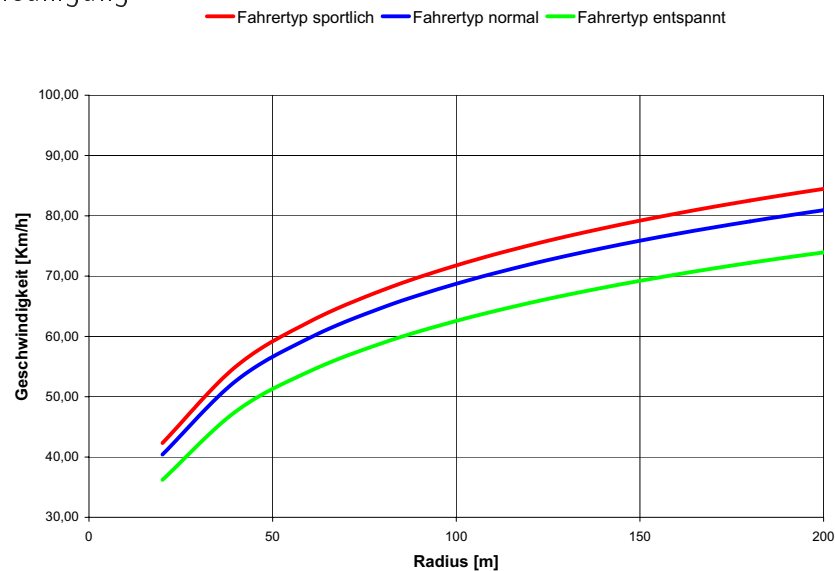


Abb. 36: Zusammenhang Radius - Geschwindigkeit für das Kriterium maximale Längsbesehleunigung

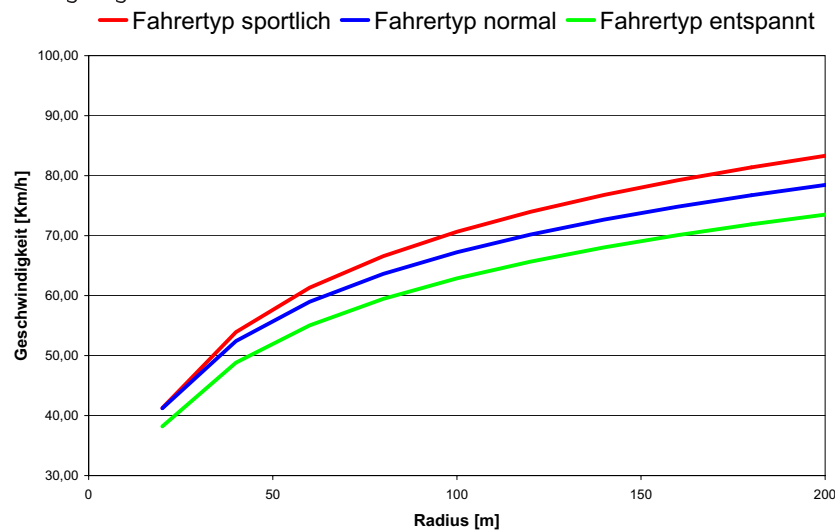


Abb. 37: Zusammenhang Radius - Geschwindigkeit für das Kriterium maximale Längsverzögerung

6.2 Auswertung der Geschwindigkeitsmessungen

In den gemessenen Einzelprofilen konnten 5229 charakteristische Geschwindigkeiten nach den unter Kap.5.4.2 genannten Kriterien gefunden werden. Für Singularitäten wurden Radien zwischen 30 und 270m detektiert. Die Verteilung ist in Abb. 38 dargestellt. Aus den Messdaten wurden 1240 charakteristische Geschwindigkeiten für Abschnitte ähnlicher Streckencharakteristik ermittelt.

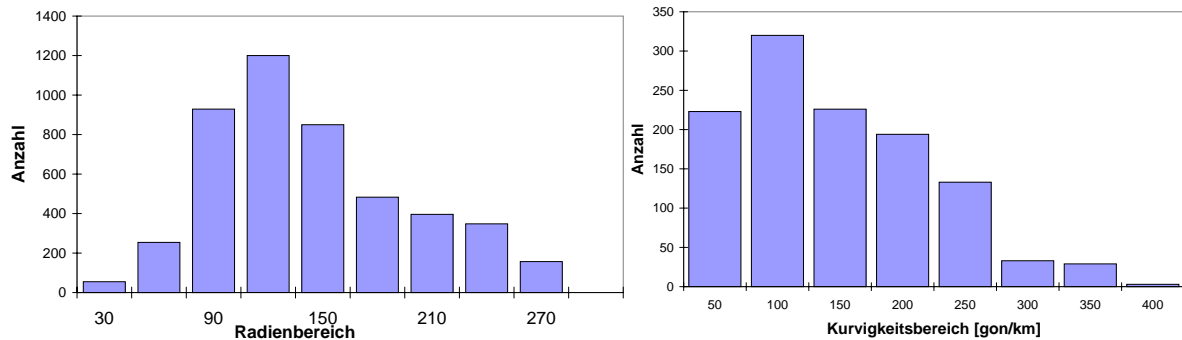


Abb. 38: Verteilung der charakteristischen Geschwindigkeiten für Singularitäten (links) und Abschnitte ähnlicher Streckencharakteristik (rechts)

6.2.1 Ergebnisse für Abschnitte ähnlicher Streckencharakteristik

6.2.1.1 Einfluss der Kurvigkeit

Durch die gewählte Auswertungsmethode (siehe Kap. 5.4) war sichergestellt, dass nur Abschnitte ausgewertet wurden, bei denen die Geschwindigkeit nahezu konstant war. Der Rückschluss auf einen streckenspezifischen Parameter zur Beschreibung der Geschwindigkeit ist somit möglich. In Abb. 39 ist der Zusammenhang zwischen Kurvigkeit und Geschwindigkeit für den Fahrertyp **entspannt**, in Abb. 40 für den Fahrertyp **normal** und in Abb. 41 für den Fahrertyp **sportlich** dargestellt. Den Abbildungen ist zu entnehmen, dass mit zunehmender Kurvigkeit die Geschwindigkeit abnimmt. Die Fahrertypen grenzen sich bezüglich des Geschwindigkeitsniveaus voneinander ab. Die Messwerte streuen stark und der Regressionskoeffizient ist sehr gering. Im Vergleich zu Singularitäten wurden sehr wenige Abschnitte ähnlicher Streckencharakteristik gefunden. Der geringe Korrelationskoeffizient (R^2) und die wenigen Abschnitte deuten an, dass sich in Kurvigkeitsabschnitten eine Fahrertypisierung viel komplexer gestaltet als bei der Bewertung von einzelnen Ereignissen (z.B. Singularitäten). Die geringe statistische Sicherheit zeigt, dass sich in Kurvigkeitsabschnitten die Einzelprofile der Fahrertypen „durchmischen“. Die Geschwindigkeit hängt somit nicht ausschließlich von der Geometrie der Strecke und vom Fahrertyp ab. Keine ermittelte Regressionsfunktion berechnet bei geringen Kurvigkeiten

eine Geschwindigkeit von mehr als 100 km/h. Dieses Ergebnis ist nicht plausibel und entspricht nicht dem tatsächlichen Fahrverhalten.

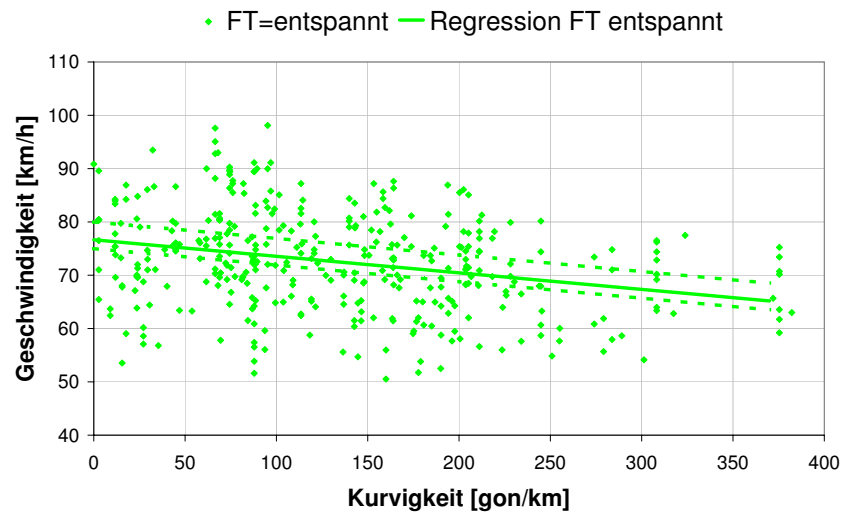
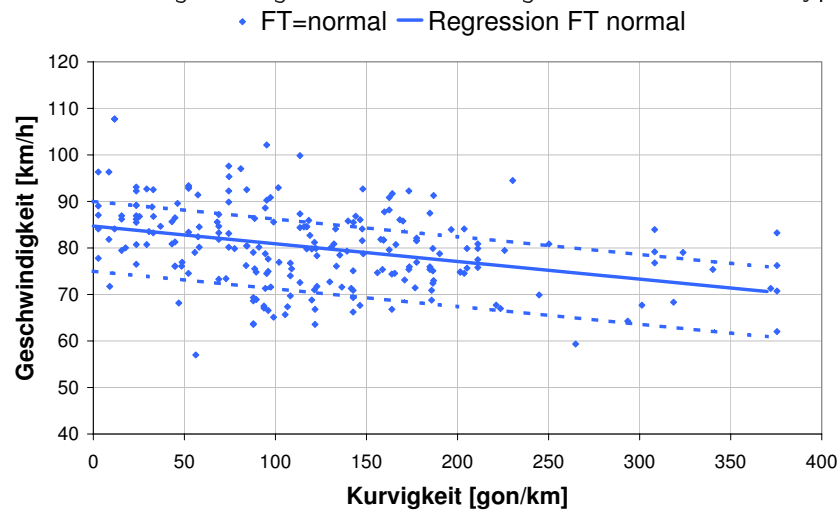
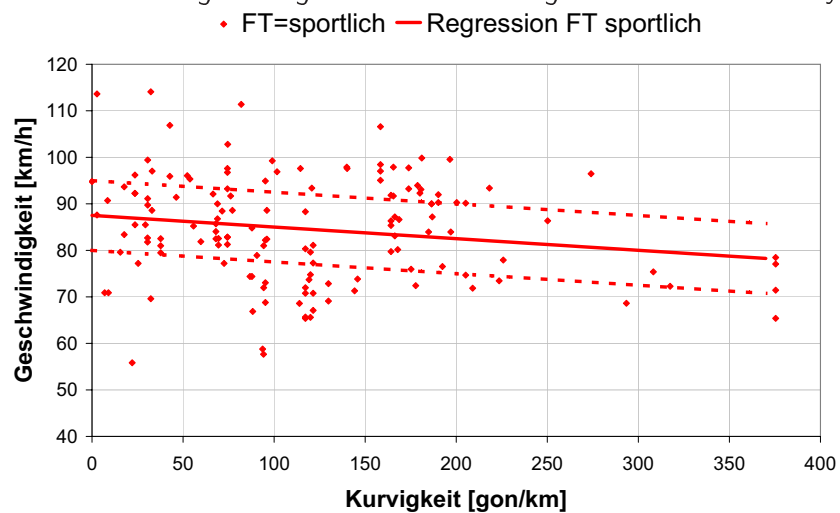
	sportlich	normal	entspannt
$K_{95\%}$	$V = 97,62 - 0,026 \cdot KU$	$V = 86,89 - 0,025 \cdot KU$	$V = 77,75 - 0,016 \cdot KU$
\bar{M}	$V = 94,20 - 0,051 \cdot KU$	$V = 85,16 - 0,035 \cdot KU$	$V = 76,33 - 0,024 \cdot KU$
$K_{5\%}$	$V = 90,77 - 0,073 \cdot KU$	$V = 83,47 - 0,046 \cdot KU$	$V = 74,92 - 0,032 \cdot KU$
Anzahl	123	305	497
R^2	0,15	0,13	0,12

V : Geschwindigkeit km/h; KU : Kurvigkeit gon/km

Tab. 7: Zusammenhang Kurvigkeit-Geschwindigkeit

6.2.1.2 Einfluss der Fahrbahnbreite

Der Einfluss der Fahrbahnbreite auf das Geschwindigkeitsverhalten in Abschnitten ähnlicher Streckencharakteristik ist in Abb. 42 dargestellt. Abzulesen ist, dass der Fahrertyp sportlich sehr deutlich seine Geschwindigkeit bei geringen Fahrbahnbreiten reduziert. Beim Fahrertyp normal nimmt der Einfluss der Fahrbahnbreite mit steigender Kurvigkeit zu. Bei geringen Kurvigkeiten erfolgt keine Anpassung der Geschwindigkeit an die Fahrbahnbreite. Für den Fahrertyp entspannt ist kein Einfluss der Fahrbahnbreite nachweisbar.

Abb. 39: Zusammenhang Kurvigkeit - Geschwindigkeit für den Fahrertyp **entspannt**Abb. 40: Zusammenhang Kurvigkeit - Geschwindigkeit für den Fahrertyp **normal**Abb. 41: Zusammenhang Kurvigkeit - Geschwindigkeit für den Fahrertyp **sportlich**

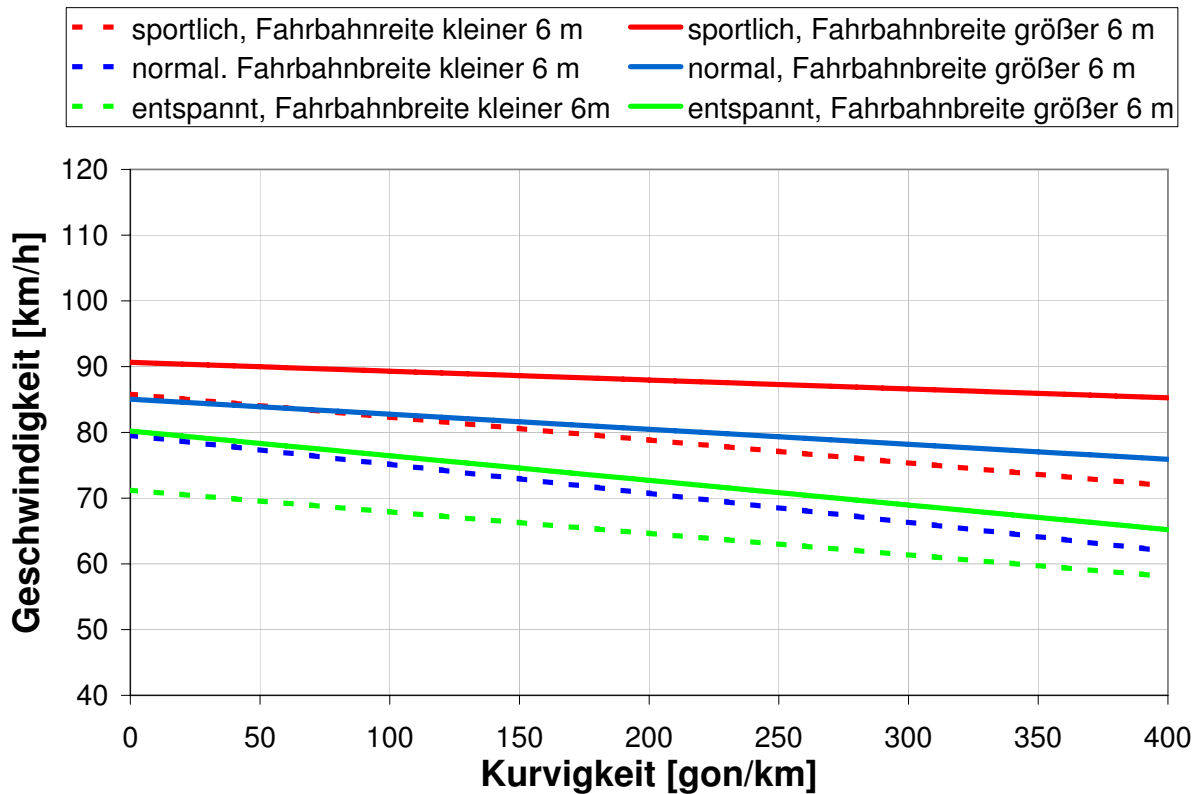


Abb. 42: Zusammenhang Fahrbahnbreite, Kurvigkeit und Geschwindigkeit

6.2.1.3 Ergebnisse über den Einfluss der Umgebungsbedingungen

In Analogie zu den Betrachtungen für Singularitäten (Kap. 6.2.2.5) erfolgten an 9 Querschnitten in Abschnitten ähnlicher Streckencharakteristik zusätzliche Messungen bei Regen und Nacht. In Abb. 50 ist das Ergebnis für einen Messquerschnitt dargestellt. In Tab. 8 sind die gemittelten Unterschiede zu den Tag-trocken Messungen für die Geschwindigkeit in Abschnitten ähnlicher Streckencharakteristik V_k für die Umgebungsbedingungen tag-nass und nacht-trocken dargestellt. Ersichtlich ist, dass der Einfluss der Umgebungsbedingungen mit geringerem Quantilswert, d.h. langsameren Fahrern, abnimmt. Bei Nacht wurde ebenfalls über alle Geschwindigkeitsbereiche tendenziell eine Geschwindigkeitszunahme gemessen. Bei Regen wurden die Geschwindigkeiten reduziert (um maximal 8 km/h). In den oberen Geschwindigkeitsbereichen (sportliche Fahrer) konnte eine stärkere Abnahme der Geschwindigkeit bei Nässe gegenüber der Geschwindigkeit bei Trockenheit als in den unteren Quantilsbereichen festgestellt werden. Dies bedeutet, dass mit zunehmender sportlicher Fahrweise die Fahrer ihre Geschwindigkeit bei Nässe reduzieren. Die Geschwindigkeitsreduzierung erfolgte in Abschnitten ähnlicher Streckencharakteristik nicht so stark wie bei den Singularitäten.

	V_{95}		V_{85}		V_{75}		V_{50}		V_{15}	
	Nacht	Regen	Nacht	Regen	Nacht	Regen	Nacht	Regen	Nacht	Regen
V_K	-0,9	-8,2	+0,1	-6,2	+1,1	-4,2	+0,9	-2,8	+0,6	-2,5

V_K : Geschwindigkeit in Kurvigkeitsabschnitten

Tab. 8: Mittlere gemessene Geschwindigkeitsdifferenzen zur Tag-trocken Messung in km/h

6.2.2 Ergebnisse für Singularitäten

Zur Untersuchung des Zusammenhanges zwischen der Zufallsvariablen Geschwindigkeit (V) und der unabhängigen Variablen Kurvenradius (R) wurde folgender Ansatz verwendet:

$$V = a \cdot \ln(R) + b + c \quad (13)$$

V Geschwindigkeit [km/h]

R Radius [m]

a, b, c Regressionskoeffizienten

Als maßgebende Geschwindigkeit wurde immer die kleinste, im Kreisbogen gemessene Geschwindigkeit verwendet. Für alle drei Fahrertypen wurden die Regressionsfaktoren a und b bestimmt (Kap. 6.2.2.1). Die ermittelten Funktionen wurden als Grundgleichung verwendet. Der Einfluss weiterer Parameter (z. B. Richtungsänderungswinkel, Fahrbahnbreite etc.) wurde über einen zusätzlichen Regressionsparameter c bestimmt. Die Parameter a und b bleiben dabei konstant.

6.2.2.1 Einfluss des Radius ohne Berücksichtigung weiterer Parameter

Ein Zusammenhang zwischen dem Radius und der Geschwindigkeit konnte bei allen Fahrertypen festgestellt werden. In den Abb. 43 bis 45 sind die ermittelten Regressionsfunktionen enthalten. Ebenso sind das 95% und 5% Konfidenzintervall dargestellt. Diese Funktionen bilden somit eine obere und untere Hüllkurve, in der alle Fahrer mit einer Wahrscheinlichkeit von 90% beschrieben werden. Ersichtlich ist, dass die größte Varianz in der Geschwindigkeit bei dem sportlichen Fahrertyp und die geringste bei dem entspannten Fahrertyp zu beobachten ist (Tab. 9). Die Streubreite beträgt bei dem Fahrertyp sportlich zwischen 20 und 25 km/h für den Fahrertyp entspannt nur 10 km/h. Es ist zu vermuten, dass der Fahrertyp sportlich den erzielbaren Radiengewinn durch „Kurvenschneiden“ besser ausnutzt als der Fahrertyp entspannt. Die statistische Sicherheit (R^2) liegt zwischen 44% und 53%. Diese ist bei dem Fahrertyp entspannt am höchsten und dem Fahrertyp sportlich am geringsten (Tab. 9). Zwischen Links- und Rechtskurven wurden im Geschwindigkeitsverhalten nur geringe Unterschiede bei dem Fahrertyp sportlich (zwei bis fünf km/h) festgestellt. Der Unterschied ist somit als gering einzustufen. Es wurde festgestellt, dass außer bei dem Fahrertyp sportlich kein Unterschied zwischen Links- und Rechtskurven in der statistischen Sicherheit (R^2) vorhanden ist. Dies lässt

vermuten, dass die Richtung der Kurve nur für den Fahrertyp sportlich einen Einfluss auf die Geschwindigkeit besitzt.

Links- und Rechtskurven			
	sportlich	normal	entspannt
$K_{95\%}$	$V = 19,45 \cdot \ln(R) - 4,74$	$V = 15,95 \cdot \ln(R) + 0,57$	$V = 15,19 \cdot \ln(R) - 3,04$
\bar{M}	$V = 18,20 \cdot \ln(R) - 10,93$	$V = 15,21 \cdot \ln(R) - 3,02$	$V = 14,62 \cdot \ln(R) - 5,78$
K_U	$V = 16,94 \cdot \ln(R) - 17,12$	$V = 14,48 \cdot \ln(R) - 6,61$	$V = 14,05 \cdot \ln(R) - 8,52$
Anzahl	957	1789	2152
R^2	0,46	0,48	0,54

Linkskurven			
	sportlich	normal	entspannt
$K_{95\%}$	$V = 19,60 \cdot \ln(R) + 0,8$	$V = 16,43 \cdot \ln(R) + 1,72$	$V = 15,59 \cdot \ln(R) - 2,06$
\bar{M}	$V = 17,78 \cdot \ln(R) - 8,16$	$V = 15,37 \cdot \ln(R) - 3,48$	$V = 14,77 \cdot \ln(R) - 6,00$
$K_{5\%}$	$V = 15,96 \cdot \ln(R) - 17,12$	$V = 16,43 \cdot \ln(R) + 8,67$	$V = 13,94 \cdot \ln(R) - 9,95$
Anzahl	481	884	1065
R^2	0,44	0,48	0,54

Rechtskurven			
	sportlich	normal	entspannt
$K_{95\%}$	$V = 20,23 \cdot \ln(R) - 4,33$	$V = 16,06 \cdot \ln(R) + 2,63$	$V = 15,29 \cdot \ln(R) - 1,52$
\bar{M}	$V = 18,47 \cdot \ln(R) - 12,95$	$V = 15,03 \cdot \ln(R) - 2,40$	$V = 14,47 \cdot \ln(R) - 5,45$
$K_{5\%}$	$V = 16,72 \cdot \ln(R) - 21,56$	$V = 14,00 \cdot \ln(R) - 7,42$	$V = 13,66 \cdot \ln(R) - 9,37$
Anzahl	477	906	1098
R^2	0,47	0,48	0,53

$K_{95\%}$: 95% Konfidenzintervall, \bar{M} : Regressionsfunktion, $K_{5\%}$: 5% Konfidenzintervall
 R : Radius [m], V : Geschwindigkeit [km/h]

Tab. 9: Funktionen für den Zusammenhang Radius - Geschwindigkeit

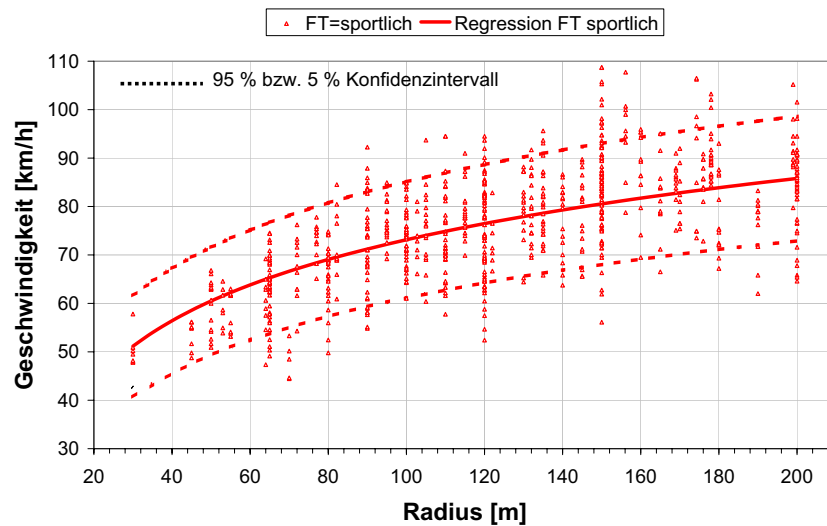


Abb. 43: Zusammenhang Radius - Geschwindigkeit für den Fahrertyp sportlich (alle Singularitäten)

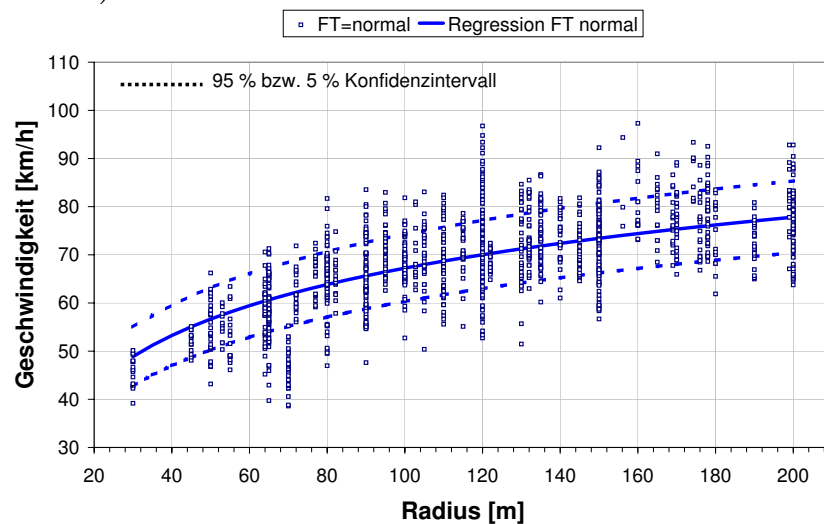


Abb. 44: Zusammenhang Radius - Geschwindigkeit für den Fahrertyp normal (alle Singularitäten)

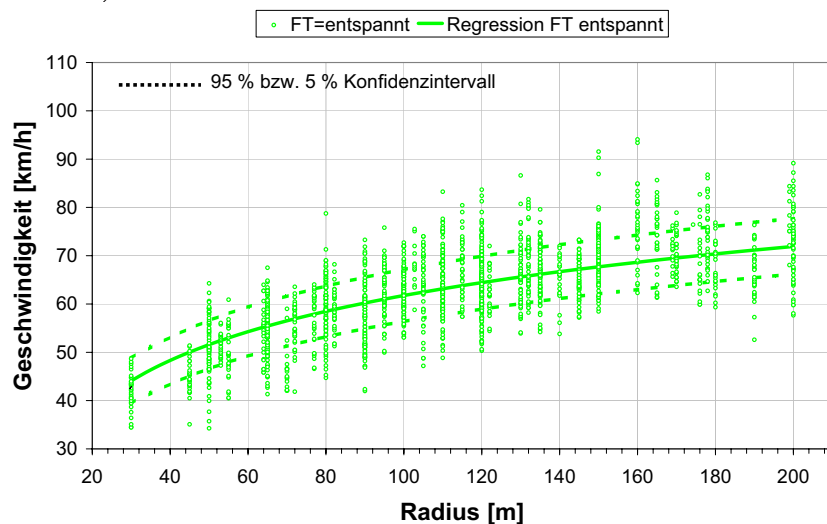


Abb. 45: Zusammenhang Radius - Geschwindigkeit für den Fahrertyp entspannt (alle Singularitäten)

6.2.2.2 Einfluss des Richtungsänderungswinkels im Bezug zum Radius

Zur Ermittlung des Einflusses vom Richtungsänderungswinkels auf die Geschwindigkeit, wurden die Kurven je nach Öffnungswinkel (β) unterteilt in:

- β kleiner 30 gon,
- β zwischen 30 und 60 gon und
- β größer 60 gon.

In Abhängigkeit vom Fahrertyp und der Kurvenrichtungsänderung wurden die ermittelten Regressionsparameter a und b aus Tab. 9 übernommen. Zusätzlich wurde ein weiterer Parameter x bestimmt:

$$V = a \cdot \ln(R) + b + x \quad (14)$$

War dieser Wert positiv, wurde für die betreffenden Kurven eine Geschwindigkeitserhöhung festgestellt. In Tab. 10 ist das Ergebnis dargestellt. Für alle Fahrertypen und Kurven konnte tendenziell eine Abnahme der Geschwindigkeit mit zunehmendem Öffnungswinkel festgestellt werden. Bei einem Öffnungswinkel kleiner 30 gon wurde eine leichte Geschwindigkeitserhöhung festgestellt. Der Einfluss des Richtungsänderungswinkels für Linkskurven ist in Abb. 46 dargestellt. Ersichtlich ist, dass sportliche Fahrertypen bei Richtungsänderungen über 60 gon ihre Geschwindigkeit um ca. 3 km/h reduzieren. Eine Geschwindigkeitsreduzierung in dieser Größenordnung konnte bei Rechtskurven und bei den Fahrertypen normal und sportlich nicht festgestellt werden. Beim Fahrertyp entspannt wurden Geschwindigkeitsreduzierungen für Öffnungswinkeln größer 60 gon von 1,33 km/h und bei dem Fahrertyp normal von 1,5 km/h festgestellt.

Dies bedeutet der Öffnungswinkel hat nicht für alle Fahrer einen Einfluss auf die Geschwindigkeit. Während der Fahrertyp sportlich in Linkskurven mit einem Öffnungswinkel größer 60 gon seine Geschwindigkeit deutlich reduziert, passen die Fahrertypen normal und entspannt ihre Geschwindigkeit kaum an. Mit größer werdendem Öffnungswinkel nähern sich der gebaute und der gefahrene Radius an. Es ist somit davon auszugehen, dass sportliche Fahrer die Möglichkeit der Radienvergrößerung in Linkskurven durch „Schneiden“ der Kurve bei geringen Öffnungswinkeln ausnutzen. Desweiteren wurde festgestellt, dass die statistische Sicherheit der Schätzung mit zunehmenden Öffnungswinkel steigt. Dies konnte bei allen Fahrertypen festgestellt werden. Bei geringen Öffnungswinkeln (kleiner 30 gon) betrug der Korrelationskoeffizient R^2 im Mittel nur 0,46, bei Richtungsänderungen größer 60 gon 0,82.

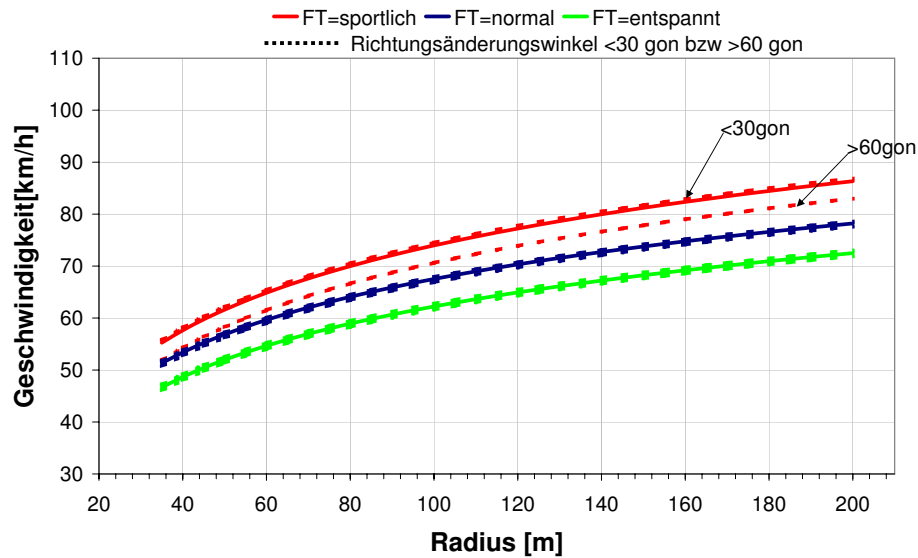


Abb. 46: Zusammenhang Radius - Geschwindigkeit und Richtungsänderungswinkel für Linkskurven

Links- und Rechtskurven									
	entspannt			normal			sportlich		
	x	R^2	Anzahl	x	R^2	Anzahl	x	R^2	Anzahl
$\beta < 30$	+0,54	0,54	964	+0,35	0,51	907	+0,46	0,46	524
$30 \leq \beta < 60$	-0,19	0,65	738	+0,18	0,63	576	+0,38	0,61	294
$\beta \leq 60$	-0,74	0,78	451	-1,36	0,78	306	-2,53	0,79	139

Linkskurven									
	entspannt			normal			sportlich		
	x	R^2	Anzahl	x	R^2	Anzahl	x	R^2	Anzahl
$\beta < 30$	+0,44	0,59	452	+0,38	0,50	445	+0,52	0,48	256
$30 \leq \beta < 60$	-0,57	0,66	389	-0,04	0,62	288	+1,04	0,54	155
$\beta \leq 60$	+0,10	0,77	224	-0,60	0,76	153	-3,35	0,68	72

Rechtskurven									
	entspannt			normal			sportlich		
	x	R^2	Anzahl	x	R^2	Anzahl	x	R^2	Anzahl
$\beta < 30$	+0,67	0,49	513	+0,36	0,51	463	+0,50	0,43	269
$30 \leq \beta < 60$	+0,20	0,60	350	+0,58	0,61	290	-0,08	0,63	141
$\beta \leq 60$	-1,49	0,78	228	-1,71	0,75	155	-0,94	0,82	69

β : Richtungsänderungswinkel, x: ermittelter Regressionsparameter

Tab. 10: Ermittelte Regressionsparameter zur Ermittlung des Einflusses des Richtungsänderungswinkels in Abhängigkeit vom Fahrertyp

6.2.2.3 Einfluss der vorgelagerten Streckengeometrie im Bezug zum Radius

In Analogie zur Untersuchung zum Einfluss des Richtungsänderungswinkels (Kap. 6.2.2.2) wurden verschiedene Gruppen gebildet. Die Eingruppierung ist abhängig von der Kurvigkeit des Annäherungsbereiches und unterteilt sich in:

- kleiner 100 gon/km,
- zwischen 100 und 200 gon/km und
- größer 200 gon/km.

Dabei wurde sowohl in die Kurvigkeit des Annäherungsbereiches (Tab. 12 und 47) und der gewichteten Kurvigkeit nach Steyer / Sossoumihen 1997 (Tab. 11 Abb. 48) unterschieden.

Der Tab. 12 und der Abb. 47 sind zu entnehmen, dass die Kurvigkeit des Annäherungsbereiches nur bei dem Fahrertyp normal einen Einfluss auf die Geschwindigkeit besitzt. Ebenso wurde festgestellt, dass die geringsten Geschwindigkeiten bei mittleren Kurvigkeiten von 100-200 gon/km gemessen wurden. Dies ist nicht plausibel. Bei der statistischen Sicherheit konnte auch kein eindeutiger Trend nachgewiesen werden. Es ist somit davon auszugehen, dass die Kurvigkeit des Annäherungsbereiches keinen nachweisbaren Einfluss auf die Kurvengeschwindigkeit für die unterschiedlichen Fahrertypen besitzt.

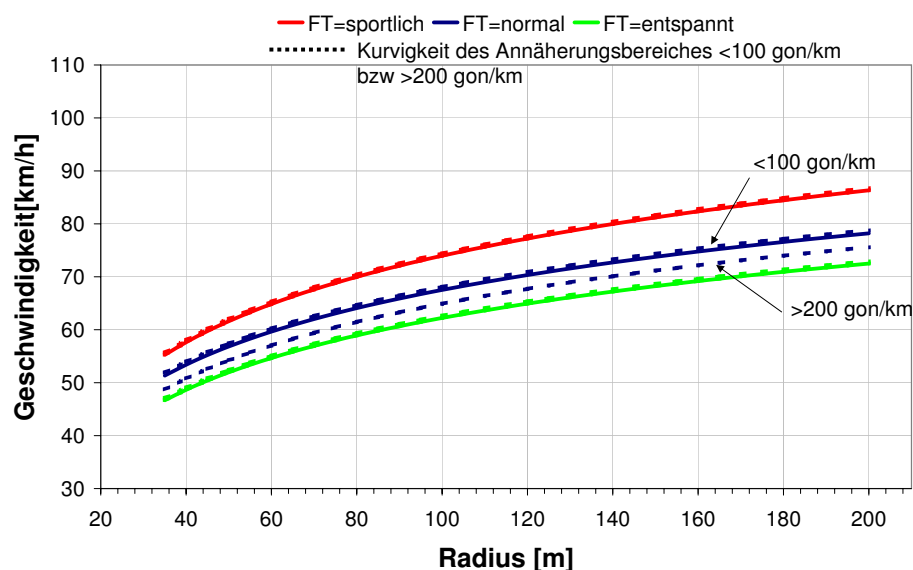


Abb. 47: Zusammenhang Radius - Geschwindigkeit und Kurvigkeit des Annäherungsbereiches für Linkskurven

Links- und Rechtskurven									
	entspannt			normal			sportlich		
	x	R^2	Anzahl	x	R^2	Anzahl	x	R^2	Anzahl
$KU < 100$	+0,60	0,70	712	+0,47	0,67	546	+0,46	0,68	280
$100 \leq KU < 200$	-0,87	0,63	425	+0,24	0,60	331	-0,15	0,63	166
$KU \leq 200$	+0,73	0,79	248	-1,13	0,64	221	+1,44	0,61	93

Linkskurven									
	entspannt			normal			sportlich		
	x	R^2	Anzahl	x	R^2	Anzahl	x	R^2	Anzahl
$KU < 100$	+0,42	0,65	425	+0,55	0,62	326	-2,01	0,62	256
$100 \leq KU < 200$	-1,44	0,50	126	+0,29	0,66	110	+1,34	0,61	155
$KU \leq 200$	+0,02	0,78	122	-2,61	0,56	111	+1,36	0,48	72

Rechtskurven									
	normal			normal			sportlich		
	x	R^2	Anzahl	x	R^2	Anzahl	x	R^2	Anzahl
$KU < 100$	+0,83	0,72	289	+0,28	0,70	221	+2,02	0,73	112
$100 \leq KU < 200$	-0,19	0,62	301	+0,62	0,50	223	+0,06	0,59	117
$KU \leq 200$	+1,97	0,64	128	+0,91	0,66	112	+2,52	0,63	49

KU : Kurvigkeit des Annäherungsbereiches in gon/km, x: ermittelter Regressionsparameter

Tab. 11: Regressionsparameter zur Ermittlung des Einflusses der gewichteten Kurvigkeit in Abhängigkeit vom Fahrertyp

Demgegenüber hat die mittlere gewichtete Kurvigkeit nach Steyer / Sossoumihen (1997) (siehe Kap. 6.2.2.3) einen Einfluss auf die Geschwindigkeit in Abhängigkeit des Fahrer-typs. Bei lang gestreckten Annäherungsbereichen (gewichtete Kurvigkeit kleiner 200 gon/km) wurde immer eine Geschwindigkeitszunahme zwischen 0,2 und 2,1 km/h ermit-telt. Mittlere gewichtete Kurvigkeit von größer 200 gon/km führten immer zu geringeren Geschwindigkeiten. In Abb. 48 ist als Beispiel der Verlauf der ermittelten Regressionskur-ven für Linkskurven dargestellt. Die obere Linie steht für eine geringe gewichtete Kur- vigkeit (kleiner 100gon/km) und die untere für hohe gewichtete Kurvigkeiten (größer 200gon/km). Bei gewichteten Kurvigkeiten kleiner 200gon/km wurde bei allen Fahrer- typen eine leichte Geschwindigkeitszunahme festgestellt. Diese war bei dem entspannten Fahrertyp am geringsten (ca. 0,5 km/h) und beim sportlichen Fahrertyp am größten (ca. 1,1 km/h). Die Geschwindigkeitsreduzierungen bei einer Kurvigkeit größer 200gon/km betrugen bis zu 4 km/h. Für alle Fahrer-typen wurde nachgewiesen, dass die mittlere gewichtete Kurvigkeit des Annäherungsbereiches einen Einfluss auf die Geschwindigkeit besitzt. Ist diese sehr groß, werden geringere Geschwindigkeiten als bei geringer gewich- teter Kurvigkeit im anschließenden Element gefahren.

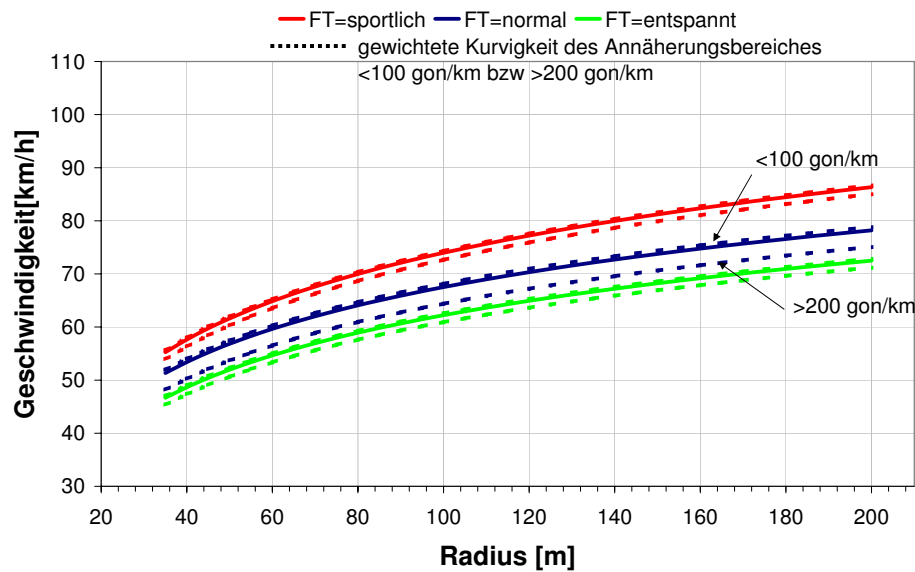


Abb. 48: Zusammenhang Radius - Geschwindigkeit und gewichtete Kurvigkeit des Annäherungsbereiches für Linkskurven

Links- und Rechtskurven									
	entspannt			normal			sportlich		
	x	R^2	Anzahl	x	R^2	Anzahl	x	R^2	Anzahl
$KU < 100$	+0,66	0,70	664	+0,51	0,68	507	+0,51	0,69	272
$100 \leq KU < 200$	+0,33	0,52	436	+1,24	0,55	331	+1,71	0,56	167
$KU \leq 200$	-1,07	0,78	286	-2,26	0,64	260	-1,82	0,65	100

Linkskurven									
	entspannt			normal			sportlich		
	x	R^2	Anzahl	x	R^2	Anzahl	x	R^2	Anzahl
$KU < 100$	+0,35	0,68	336	+0,61	0,66	257	-0,70	0,64	169
$100 \leq KU < 200$	+0,20	0,45	213	+0,87	0,55	170	+1,33	0,53	51
$KU \leq 200$	-1,31	0,73	124	-3,14	0,53	120	-0,96	0,53	46

Rechtskurven									
	entspannt			normal			sportlich		
	x	R^2	Anzahl	x	R^2	Anzahl	x	R^2	Anzahl
$KU < 100$	+0,99	0,71	329	+0,49	0,69	251	+1,85	0,71	135
$100 \leq KU < 200$	+0,74	0,50	225	+1,99	0,43	163	+2,14	0,53	87
$KU \leq 200$	-0,35	0,71	164	-1,03	0,65	142	-1,42	0,66	56

KU : Kurvigkeit des Annäherungsbereiches in gon/km, x: ermittelter Regressionsparameter

Tab. 12: Regressionsparameter zur Ermittlung des Einflusses der Kurvigkeit in Abhängigkeit vom Fahrertyp

6.2.2.4 Einfluss der Fahrbahnbreite im Bezug zum Radius

Alle Untersuchungsstrecken wurden unterschieden in Fahrbahnbreiten:

- größer 6,0 m und
- kleiner 6,0 m.

Der Einfluss der Fahrbahnbreite auf die Geschwindigkeit ist in der Tab. 13 und in der Abb. 49 für Linkskurven dargestellt. Ersichtlich ist, dass die Fahrbahnbreite einen Einfluss auf die Geschwindigkeit besitzt. Bei breiten Fahrbahnen werden höhere Geschwindigkeiten als bei schmalen Fahrbahnen gefahren. Mit größerer Fahrbahnbreite und zunehmender sportlicher Fahrweise wird die statistische Sicherheit geringer. In Linkskurven beträgt der Einfluss der Fahrbahnbreite im Mittel 1,6 km/h bei dem Fahrertyp entspannt und 2,4 km/h beim Fahrertyp sportlich. Etwas höher ist der Einfluss in Rechtskurven. Der Unterschied in den Geschwindigkeiten beträgt zwischen 3,6 km/h für den entspannten Fahrertyp und 5,3 km/h für den sportlichen Fahrertyp. Das unterschiedliche Verhalten in Links- und Rechtskurven kann mit unterschiedlichen Radienvergrößerungen durch „Kurvenschneiden“ begründet werden.

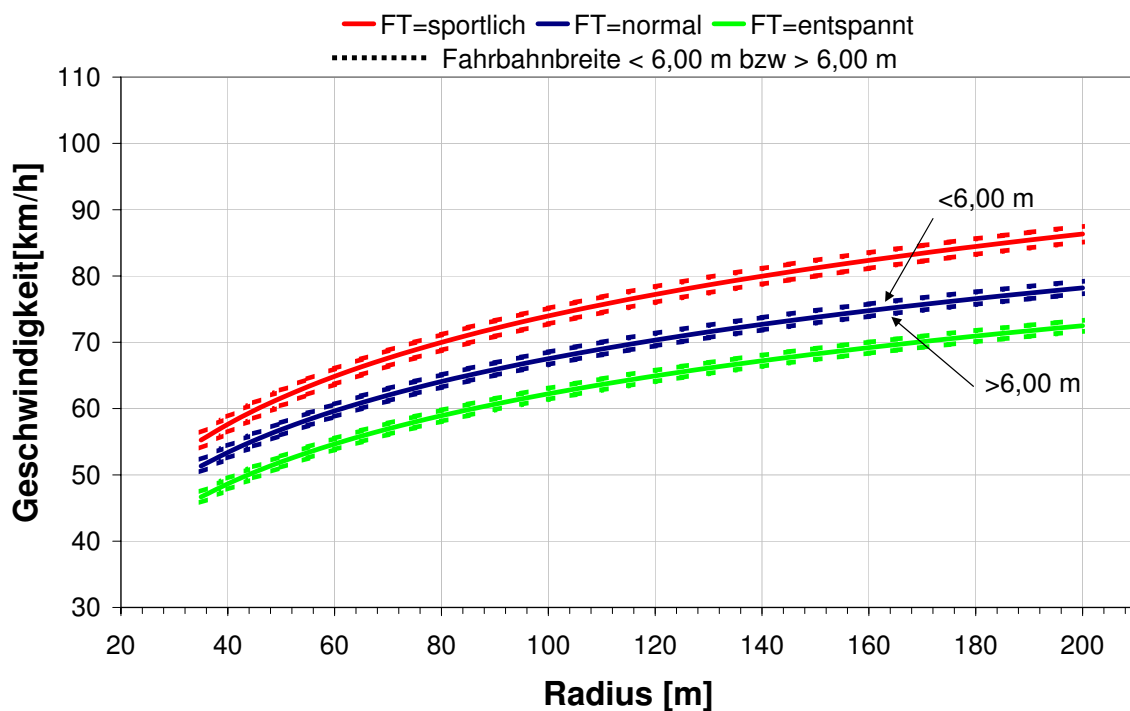


Abb. 49: Zusammenhang Radius - Geschwindigkeit und Fahrbahnbreite für Linksskurven

Links- und Rechtskurven									
	entspannt			normal			sportlich		
	x	R^2	Anzahl	x	R^2	Anzahl	x	R^2	Anzahl
$B < 6m$	-1,04	0,76	1250	-1,07	0,69	1006	-1,88	0,66	485
$B \leq 6m$	+1,48	0,62	903	+1,38	0,62	783	+1,93	0,63	472

Linkskurven									
	entspannt			normal			sportlich		
	x	R^2	Anzahl	x	R^2	Anzahl	x	R^2	Anzahl
$B < 6m$	-0,84	0,78	126	-0,86	0,70	477	-1,20	0,65	236
$B \leq 6m$	+0,83	0,59	122	+1,00	0,58	407	+1,16	0,61	245

Rechtskurven									
	entspannt			normal			sportlich		
	x	R^2	Anzahl	x	R^2	Anzahl	x	R^2	Anzahl
$B < 6m$	-1,33	0,75	674	+1,28	0,69	529	-2,55	0,68	249
$B \leq 6m$	+2,25	0,60	416	-1,80	0,65	377	+2,79	0,64	228

B: Fahrbahnbreite in m, x: ermittelter Regressionsparameter

Tab. 13: Regressionsparameter zur Ermittlung des Einflusses der Fahrbahnbreite in Abhängigkeit vom Fahrertyp

6.2.2.5 Einfluss der Umgebungsbedingungen im Bezug zum Radius

An fünf Messquerschnitten (siehe Kap. 5.4.3) wurde die Geschwindigkeit bei

- Tageslicht, trocken,
- Nacht, trocken und
- Tageslicht, nass

gemessen. Die Regenmessungen erfolgten nur bei starken Niederschlägen. An den Messquerschnitten wurden in beiden Richtungen die minimale Kurvengeschwindigkeit (V_{min}) und die Annäherungsgeschwindigkeit (V_{an}) gemessen. Zu jedem Messquerschnitt lagen nach Abschluss der Messungen sechs Messreihen (Tag-trocken, Tag-nass, Nacht-trocken für V_{min} und V_{an}) vor. In Abb. 50 ist das Ergebnis für einen Messquerschnitt dargestellt. Ersichtlich ist, dass bis zu einer Summenhäufigkeit von 60 % die Linien nahezu identisch sind. Dies bedeutet, dass hier die Umgebungsbedingungen keinen Einfluss auf die Geschwindigkeit besitzen. Im oberen Bereich wurden bei Regen bzw. Nacht (grüne bzw. blaue Linie in der Abb. 50) geringere Geschwindigkeiten gemessen. Fahrer, die sich im oberen Geschwindigkeitsbereich bewegten (Fahrertyp sportlich), passten ihre Geschwindigkeit an. In Tab. 14 sind die gemittelten Unterschiede zu den Tag-trocken Messungen für die Annäherungsgeschwindigkeit V_{AN} und die minimale Kurvengeschwindigkeit V_{min} für die Umgebungsbedingungen tag-nass und nacht-trocken dargestellt. Aufgezeigt wird, dass

der Einfluss der Umgebungsbedingungen im unteren Geschwindigkeitsbereich abnimmt. Bei Nacht wurde über alle Geschwindigkeitsbereiche tendenziell eine Geschwindigkeitszunahme gemessen. Bei Regen wurden die Geschwindigkeiten reduziert (maximal 9 km/h). In den oberen Geschwindigkeitsbereichen (Fahrertyp sportlich) konnte eine stärkere Abnahme der Geschwindigkeit bei Nässe gegenüber der Geschwindigkeit bei Trockenheit als in den unteren Quantilsbereichen festgestellt werden. Dies bedeutet, dass mit zunehmender sportlicher Fahrweise die Fahrer ihre Geschwindigkeit bei Nässe reduzieren.

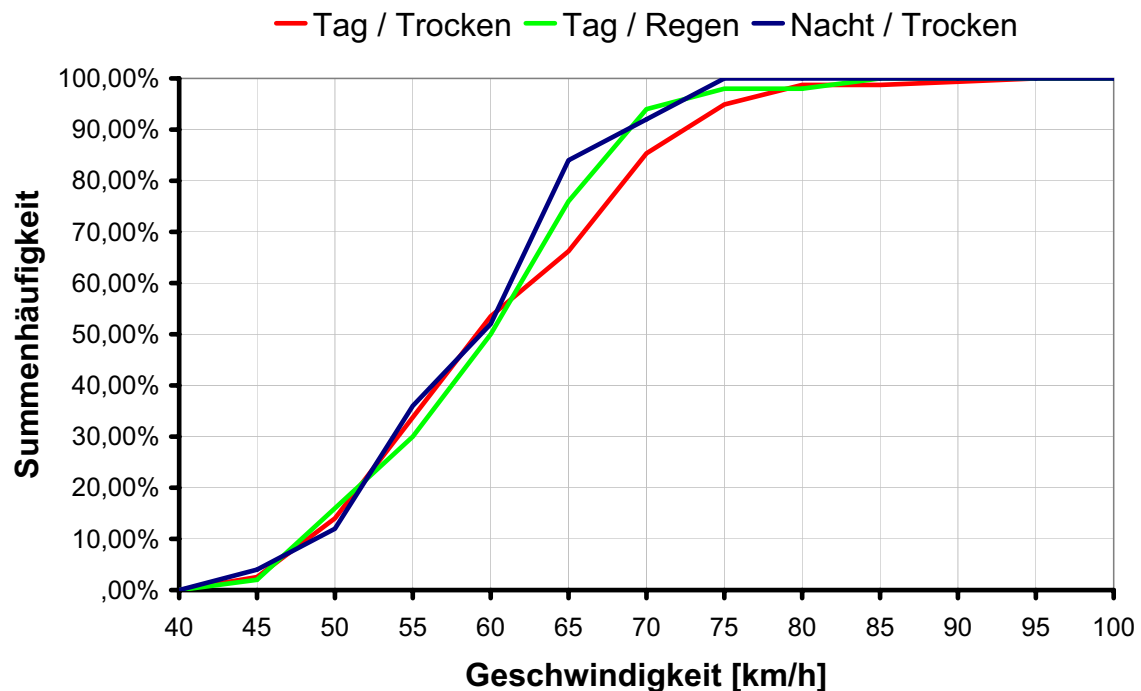


Abb. 50: Verteilung der Geschwindigkeiten (Summenhäufigkeit) für unterschiedliche Umgebungsbedingungen an einem Messquerschnitt

	V_{95}		V_{85}		V_{75}		V_{50}		V_{15}	
	Nacht	Regen	Nacht	Regen	Nacht	Regen	Nacht	Regen	Nacht	Regen
V_{AN}	+2,4	-8,8	+0,5	-6,4	+0,7	-5,9	+0,2	-4,4	-0,3	-3,0
V_{min}	-1,0	-8,7	+0,2	-6,2	-0,5	-5,5	+0,1	-4,4	+0,5	-2,3

V_{AN} : Annäherungsgeschwindigkeit bei Singularitäten

V_{min} :minimale Kurvengeschwindigkeit in Singularitäten

Tab. 14: Mittlere gemessene Geschwindigkeitsdifferenzen im Bezug zur Tag-trocken Messung in km/h

6.2.3 Schlussfolgerungen für die Geschwindigkeitsprognose

Die über 1000 gemessenen Geschwindigkeits- und Beschleunigungsprofile sowie die über 1000 Einzeldaten aus den Querschnittsmessungen konnten nach dem unter Kap. 5.4.1 beschriebenen Verfahren einem Fahrertyp (sportlich, normal oder entspannt) zugeordnet werden.

Für **Singularitäten** konnte der Zusammenhang zwischen Radius und Geschwindigkeit für alle Fahrertypen nachgewiesen werden. In der Streuung und Varianz der Messwerte sind Unterschiede in Abhängigkeit vom Fahrertyp vorhanden. Bei den sportlichen Fahrern ist die statistische Sicherheit der ermittelten Regressionsfunktionen am geringsten, bei den entspannten Fahrern am größten. Als weitere Einflussfaktoren (zusätzlich zum Radius) wurden der

- Richtungsänderungswinkel,
- die vorgelagerte Kurvigkeit,
- die mittlere gewichtete Kurvigkeit,
- die Fahrbahnbreite und
- der Einfluss der Umgebungsbedingungen Nässe / Regen und Nacht

auf das Fahrverhalten untersucht. In Abb. 18 ist der jeweilige Einfluss der unterschiedlichen Größen auf die Geschwindigkeit ersichtlich. Ausgehend vom Zusammenhang zwischen Radius und Geschwindigkeit (V_G) kommen in Abhängigkeit des Fahrertyps und der Geometrie unterschiedlich viele weitere Einflussgrößen dazu.

	Fahrertyp entspannt			Fahrertyp normal			Fahrertyp sportlich		
	$V_G = a \cdot \ln(R) + b + x$								
Richtung	alle	Links	Rechts	alle	Links	Rechts	alle	Links	Rechts
Grundgeschwindigkeit $V_G(a)$	14,62	14,77	14,47	15,21	15,37	15,03	18,20	17,78	18,47
Grundgeschwindigkeit $V_G(b)$	-5,78	-6,00	-5,45	-3,02	-3,48	-2,40	-10,93	-8,16	-12,95
Berücksichtigung Richtungsänderungswinkel β									
$\beta < 30gon$	+0,54	—	+0,67	+0,35	+0,38	—	+0,46	+0,52	+0,50
$30 \leq \beta < 60gon$	-0,19	—	+0,20	+0,18	-0,04	—	+0,38	—	—
$\beta \geq 60gon$	-0,74	—	-1,49	-1,36	-0,60	-1,71	-2,53	-3,35	-0,94
Berücksichtigung vorgelagerte Streckencharakteristik ΔKU									
$\Delta KU < 100gon/km$	+0,66	+0,35	+0,99	—	—	—	—	—	—
$100 \leq \Delta KU < 200gon/km$	+0,33	+0,20	+0,74	—	—	—	—	—	—
$\Delta KU \geq 200gon/km$	-1,07	-1,31	-0,35	-2,26	-3,15	-1,03	-1,82	—	-1,42
Berücksichtigung Fahrbahnbreite B									
$B < 6m$	-1,04	-0,84	-1,33	-1,07	-0,86	+1,28	-1,88	-1,20	-2,55
$B \geq 6m$	+1,48	+0,83	+2,25	+1,38	+1,00	-1,80	+1,93	+1,16	+2,79
Berücksichtigung Umgebungsbedingungen Nässe / Regen und Nacht B									
Nässe / Regen	-8,7			-5,			-4,4		
Nacht	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Tab. 15: Einflüsse unterschiedlicher Parameter auf die Geschwindigkeit in Abhängigkeit vom Fahrertyp

Für zusammenhängende Streckenabschnitte (Abschnitte ähnlicher Streckencharakteristik) wurde ein Zusammenhang Kurvigkeit - Geschwindigkeit ermittelt. Dieser besitzt eine geringe statistische Sicherheit. Im Bereich geringer Kurvigkeiten ist die berechnete Regressionsfunktionen unplausibel (siehe Kap. 6.2.1.1). Aus diesem Grund müssen die Funktionen auf Grundlage früherer Forschungsarbeiten im Bereich geringer Kurvigkeiten angepasst werden. Der Einfluss der Fahrbahnbreite auf die Geschwindigkeit in Kurvigkeitsabschnitten ist vom Fahrertyp abhängig. Bei den Fahrertypen sportlich und normal wurde mit zunehmender Kurvigkeit eine Anpassung der Geschwindigkeit (Reduzierung) festgestellt. Dies ist plausibel und wird im Modell berücksichtigt. Für den Fahrertyp entspannt wurde in Kurvigkeitsabschnitten keine Anpassung der Geschwindigkeit an die Fahrbahnbreite ermittelt. Der Einfluss der Umgebungsbedingungen Nässe / Regen und Nacht ist analog den Singularitäten.

Auf der Grundlage der beschriebenen Erkenntnisse wurde das nachfolgend beschriebene Modell zur Geschwindigkeitsprognose entwickelt.

6.2.4 Geschwindigkeitsprognosemodell

In den Geschwindigkeitsauswertungen wurden unterschiedliche Einflüsse auf das Geschwindigkeitsverhalten von Kraftfahrern festgestellt. Generell erfolgte eine Einteilung der Strecke in:

- Singularitäten und
- Abschnitte ähnlicher Streckencharakteristik Abb.51.

Für die Geschwindigkeitsprognose stehen jeweils unterschiedliche Variablen zur Verfügung. Aus diesem Grund muss die Geschwindigkeitsberechnung differenziert erfolgen. Handelt es sich um einen Abschnitt ähnlicher Streckencharakteristik, erfolgt die Abschätzung der Geschwindigkeit in Abhängigkeit von den Variablen:

- Fahrertyp,
- Kurvigkeit,
- Regen und
- Fahrbahnbreite.

In Bereichen geringer Kurvigkeit lässt sich die Geschwindigkeit über einen längeren Abschnitt nicht zuverlässig prognostizieren (siehe Kap. 6.2.3). Das ermittelte Geschwindigkeitsmodell liefert für diesen Bereich zu geringe Geschwindigkeiten. Aus diesem Grund muss eine Anpassung erfolgen. Dies geschieht in der Form, dass in Abhängigkeit vom Fahrertyp eine Geschwindigkeit auf Geraden vorgegeben wird. Bis zu einer definierten Kurvigkeit wird diese maximale Geschwindigkeit beibehalten. Die Geschwindigkeiten in diesen Bereichen wurden in Anlehnung an das aktuelle Richtlinienwerk RAS-L (1995)

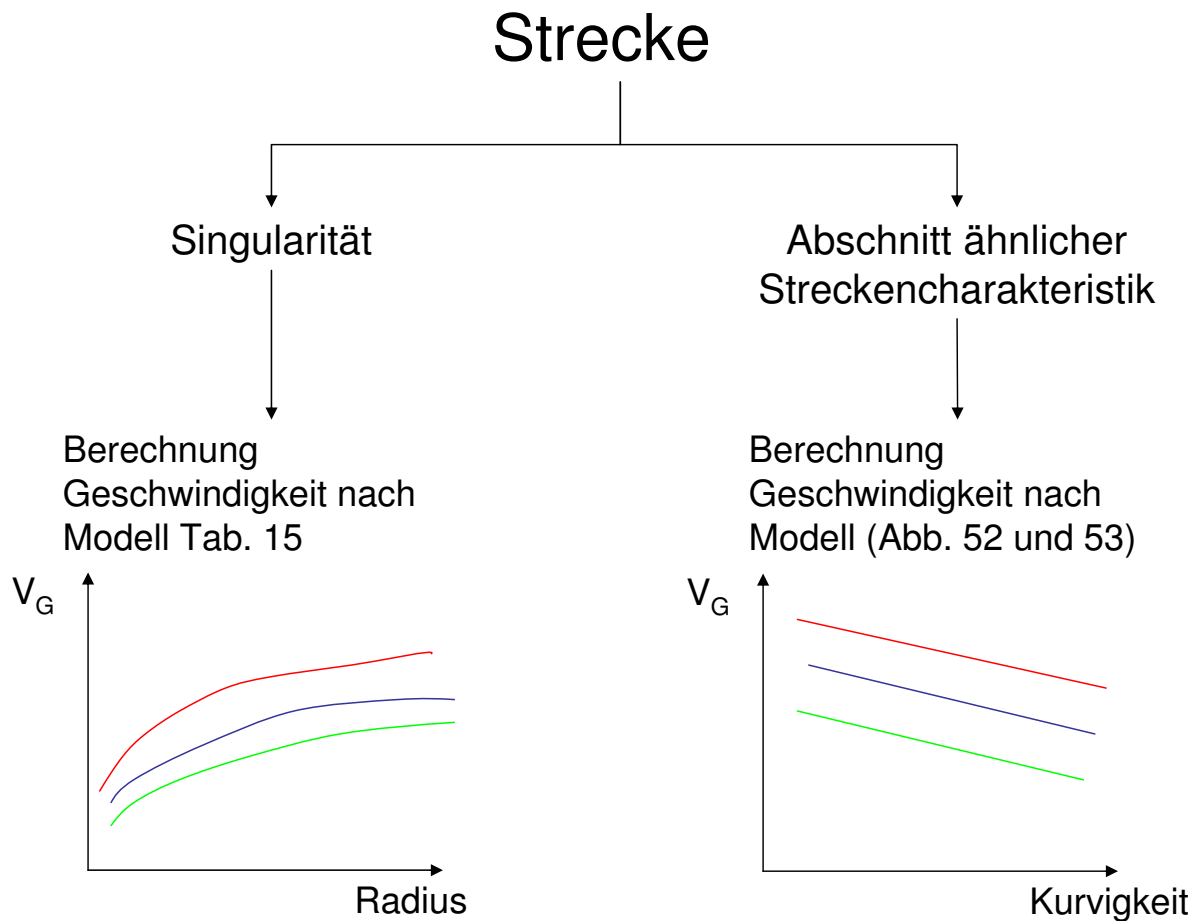


Abb. 51: Geschwindigkeitsprognosemodell

bzw. Lippold (1997) festgelegt. In Abhängigkeit vom Fahrertyp erfolgt im Weiteren eine lineare Anpassung der Geschwindigkeit an die Kurvigkeit. Unterschiedliche Fahrbahnbreiten werden hier direkt berücksichtigt (Abb. 52 und 53). In der Abb. 52 ist das Modell für Fahrbahnbreiten kleiner als 6,0 m und in der Abb. 53 für Fahrbahnbreiten größer als 6,0 m dargestellt. Ersichtlich ist, dass mit abnehmender sportlicher Fahrweise eine schnellere Anpassung der Geschwindigkeit an die Kurvigkeit erfolgt. Bei schmalen Fahrbahnen erfolgt ebenfalls eher eine Anpassung der Geschwindigkeit als bei breiten Fahrbahnen. Tritt das Ereignis Regen ein, werden von der berechneten Geschwindigkeit für den Fahrertyp:

- sportlich: 6,2 km/h,
- normal: 4,2 km/h und
- entspannt: 2,8 km/h

abgezogen.

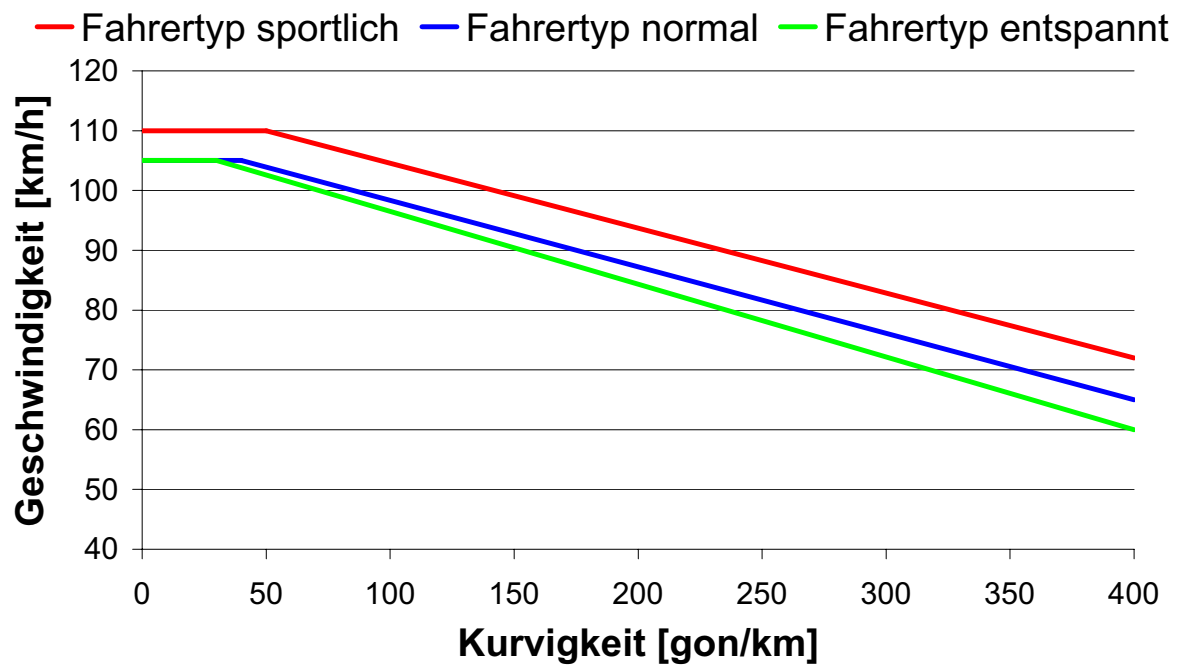


Abb. 52: Geschwindigkeitsprognosemodell für Abschnitte ähnlicher Streckencharakteristik für Fahrbahnbreiten kleiner 6,0 m

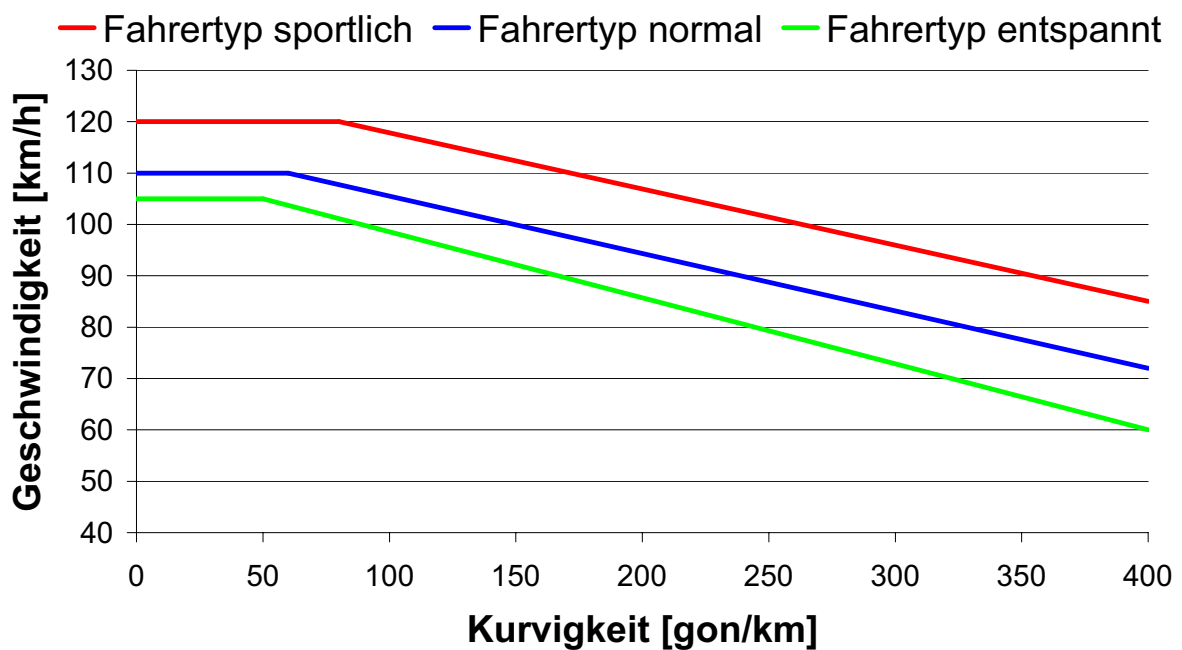


Abb. 53: Geschwindigkeitsprognosemodell für Abschnitte ähnlicher Streckencharakteristik für Fahrbahnbreiten größer 6,0 m

Handelt es sich um **Singularitäten**, erfolgt die Geschwindigkeitsberechnung differenzierter. Es werden die Parameter:

- Radius,
- Richtung der Kurve (Links- oder Rechtskurve),
- Richtungsänderungswinkel,
- Fahrbahnbreite,
- Streckencharakteristik vor der Singularität und
- Nässe / Regen

betrachtet. Sollte aus technischen Gründen eine der Variablen nicht zur Verfügung stehen, soll das Modell dennoch eine Geschwindigkeit prognostizieren können. Aus diesem Grund erfolgt im ersten Schritt die Berechnung einer Grundgeschwindigkeit V_G in Abhängigkeit vom Radius. Dies bedeutet, es muss nur der Radius bekannt sein, damit eine Geschwindigkeitsprognose möglich ist. In Abhängigkeit vom Fahrstil und der Kurvenrichtung werden unterschiedlich viele weitere geometrische Parameter berücksichtigt. Die Werte aus Tab. 18 wurden direkt übernommen.

6.3 Auswertung der Quer- und Längsbeschleunigungen

6.3.1 Auswertung der Querbeschleunigungen

In den Abb. 54 bis 56 sind die gemessenen Querbeschleunigungen in Abhängigkeit vom Fahrertyp und Radius dargestellt. Den Abbildungen ist zu entnehmen, dass sich die unterschiedlichen Fahrertypen in den maximalen Querbeschleunigungen deutlich unterscheiden. Mit zunehmendem Radius und somit zunehmender Geschwindigkeit nimmt die Querbeschleunigung deutlich ab. Bei geringen Radien werden bedeutend höhere Querbeschleunigungen akzeptiert als bei größeren Radien. Für jeden Fahrertyp lässt sich ein Toleranzband für akzeptierte Querbeschleunigungen in Abhängigkeit vom Radius bzw. der Geschwindigkeit definieren. Der Streubereich der Querbeschleunigung ist bei dem Fahrertyp sportlich wieder am größten. In Tab. 16 sind die Ergebnisse ersichtlich.

- Fahrertyp **entspannt**

$$K_{95\%} : a_{quer} = 0,000070 \cdot R^2 - 0,028491 \cdot R + 7,455 \quad (15)$$

$$\bar{M} : a_{quer} = 0,000070 \cdot R^2 - 0,033584 \cdot R + 7,069 \quad (16)$$

$$K_{5\%} : a_{quer} = 0,000070 \cdot R^2 - 0,038677 \cdot R + 6,682 \quad (17)$$

$$Anzahl : 971$$

$$R^2 : 0,32$$

- Fahrertyp **normal**

$$K_{95\%} : a_{quer} = 0,000042 \cdot R^2 - 0,020539 \cdot R + 5,91 \quad (18)$$

$$\bar{M} : a_{quer} = 0,000042 \cdot R^2 - 0,023 \cdot R + 5,713 \quad (19)$$

$$K_{5\%} : a_{quer} = 0,000042 \cdot R^2 - 0,025462 \cdot R + 5,516 \quad (20)$$

$$Anzahl : 1771$$

$$R^2 : 0,32$$

- Fahrertyp **sportlich**

$$K_{95\%} : a_{quer} = 0,000036 \cdot R^2 - 0,014004 \cdot R + 4,66 \quad (21)$$

$$\bar{M} : a_{quer} = 0,000036 \cdot R^2 - 0,016842 \cdot R + 4,478 \quad (22)$$

$$K_{5\%} : a_{quer} = 0,000036 \cdot R^2 - 0,019681 \cdot R + 4,296 \quad (23)$$

$$Anzahl : 2039$$

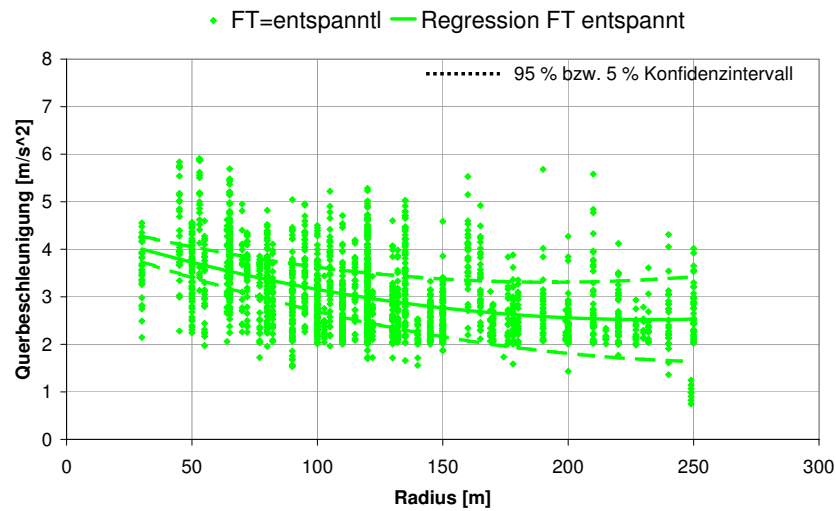
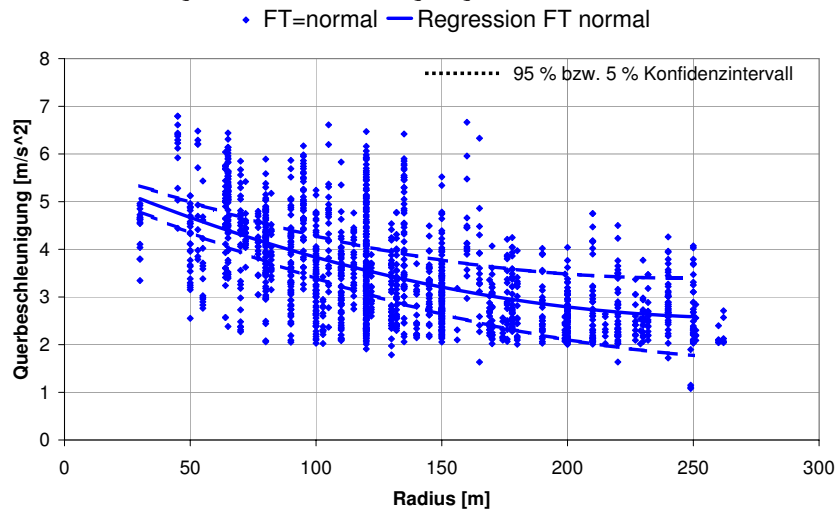
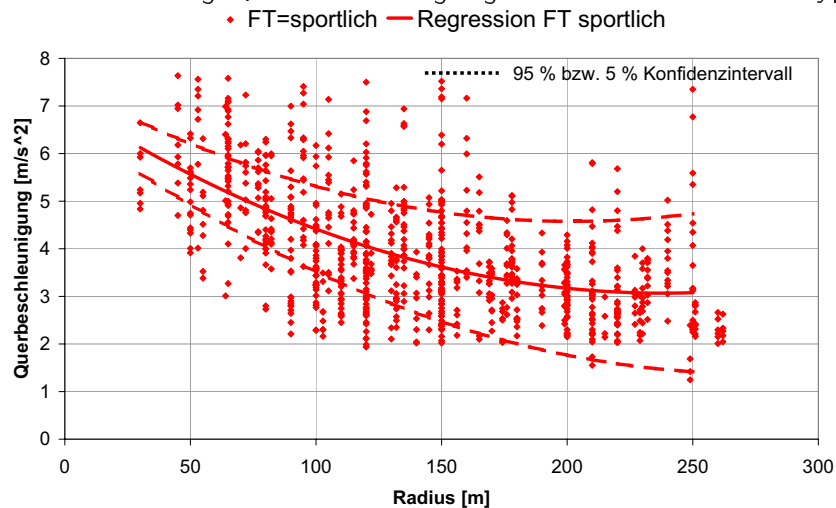
$$R^2 : 0,20$$

Tab. 16: Regressionsfunktion zur Beschreibung des Zusammenhanges Querbeschleunigung - Radius

6.3.2 Auswertung der Längsverzögerungen

Die Modellierung der Längsverzögerung ist für das SC - System eine wesentliche Voraussetzung. Mit Hilfe dieses Modells lässt sich der Empfehlungs- bzw. Regelungszeitpunkt für eine Geschwindigkeitsreduzierung bestimmen. In Abb. 57 ist der Geschwindigkeitsverlauf an einem Beispiel dargestellt. An der Station 160 wird die Zielgeschwindigkeit von ca. 78 km/h erreicht. Bereits an Station 0 wird aber bereits mit der Verzögerung begonnen. Dies bedeutet, dass in diesem Beispiel ca. 160 m vorher die Verzögerung beginnen muss. Der dazwischen liegende Verzögerungsverlauf lässt sich mit Hilfe der Parameter:

- mittlere Bremsverzögerung,
- maximale Bremsverzögerung und
- Bremsweg

Abb. 54: Zusammenhang Querbeschleunigung-Radius für den Fahrertyp **entspannt**Abb. 55: Zusammenhang Querbeschleunigung-Radius für den Fahrertyp **normal**Abb. 56: Zusammenhang Querbeschleunigung-Radius für den Fahrertyp **sportlich**

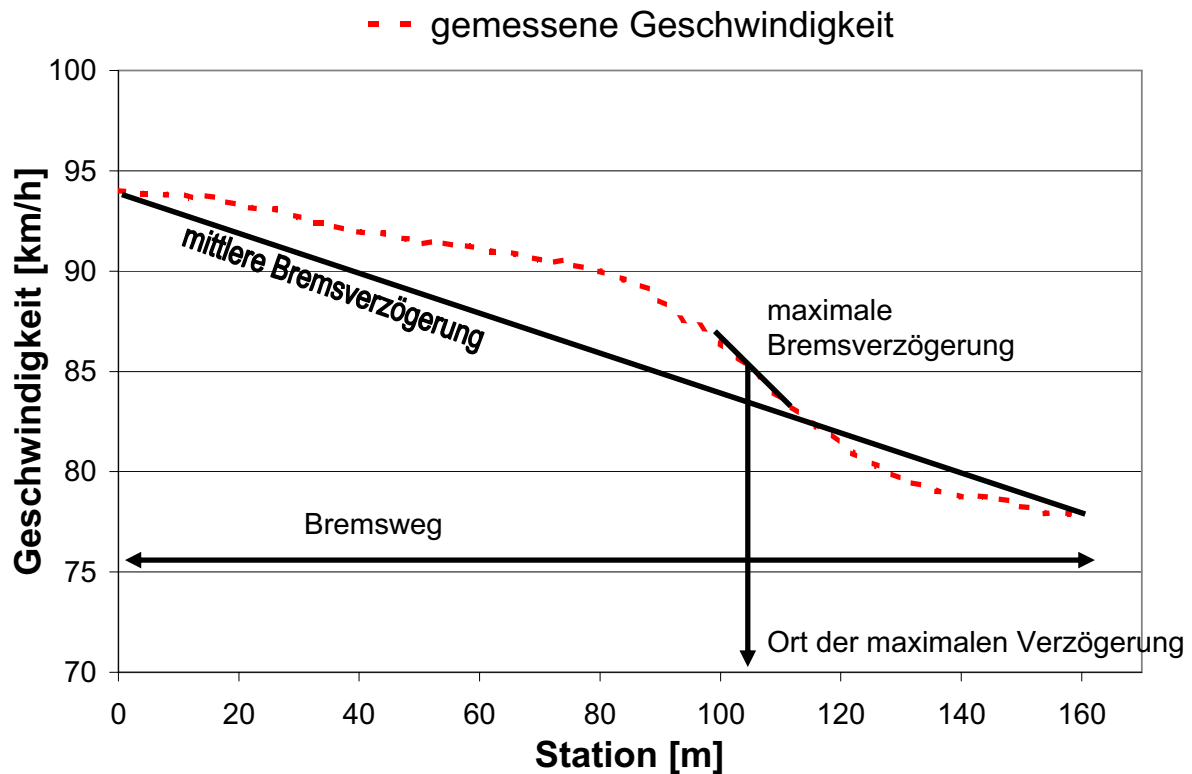


Abb. 57: Ausgewertete Kennstellen der Längsverzögerung

charakterisieren. Diese Größen lassen sich aus den Daten für Singularitäten nach den Gleichungen 24 und 25 berechnen.

$$s_{brems} = Stat_{V_{ziel}} - Stat_{V_{start}} \quad (24)$$

$$a_{mittel} = \frac{V_{Ausgang}^2 - V_{Ziel}^2}{2 \cdot 3,6^2 \cdot s_{brems}} \quad (25)$$

6.3.2.1 Einfluss der Geschwindigkeitsdifferenz

Der Zusammenhang zwischen der Geschwindigkeitsänderung und der maximalen bzw. durchschnittlichen Bremsverzögerung ist in der Tab. 17 bzw. den Abb. 58 bis 63 in Abhängigkeit vom Fahrertyp dargestellt. Ersichtlich ist, dass die Werte stark streuen. Die statistischen Sicherheiten sind gering. Gründe für die großen Streuungen sind die schwierige Definition des Anfangspunktes der Verzögerung und die Erfassung der Daten (siehe Kap. 6.1). Geringe Fehler in der Bestimmung der Station führen zu anderen Werten für die ermittelte Verzögerung. Dennoch lässt sich erkennen, dass mit zunehmender Geschwindigkeitsdifferenz die durchschnittliche und die maximale Beschleunigungen zunehmen. Bei einer Geschwindigkeitsdifferenz von 10 km/h ist eine mittlere Verzögerung von 0,5

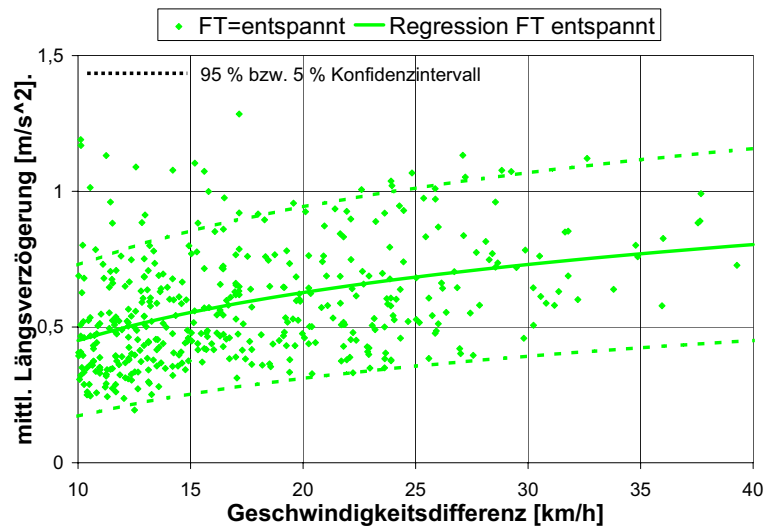


Abb. 58: Zusammenhang mittlere Längsverzögerung - Geschwindigkeitsdifferenz für den Fahrertyp **entspannt**

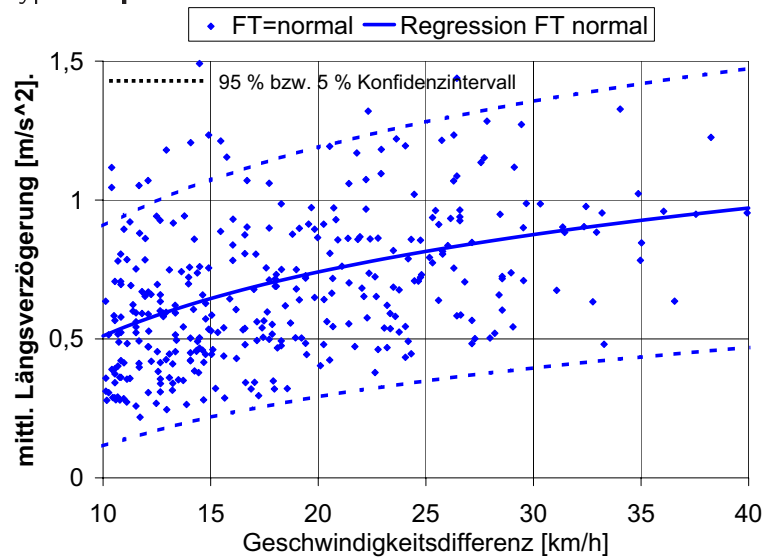


Abb. 59: Zusammenhang mittlere Längsverzögerung - Geschwindigkeitsdifferenz für den Fahrertyp **normal**

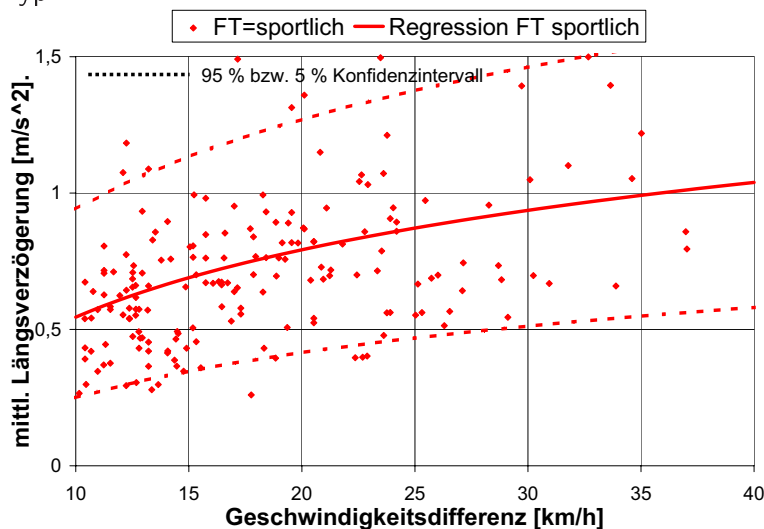


Abb. 60: Zusammenhang mittlere Längsverzögerung - Geschwindigkeitsdifferenz für den Fahrertyp **sportlich**

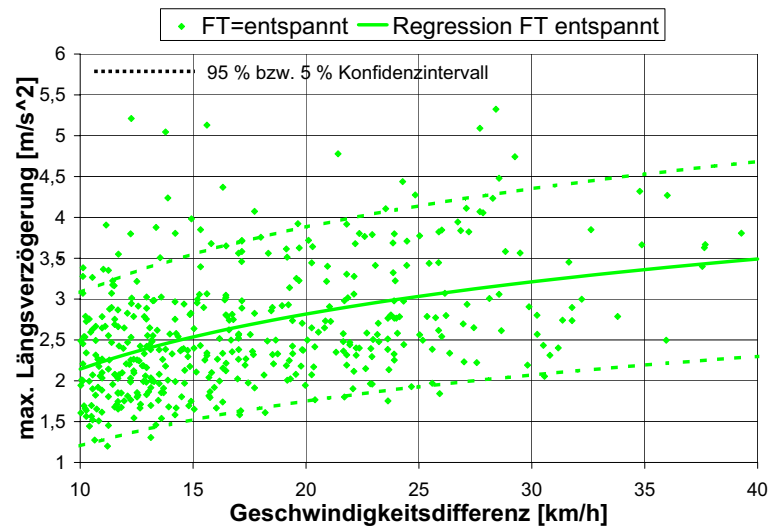


Abb. 61: Zusammenhang maximale Längsverzögerung - Geschwindigkeitsdifferenz für den Fahrertyp **entspannt**

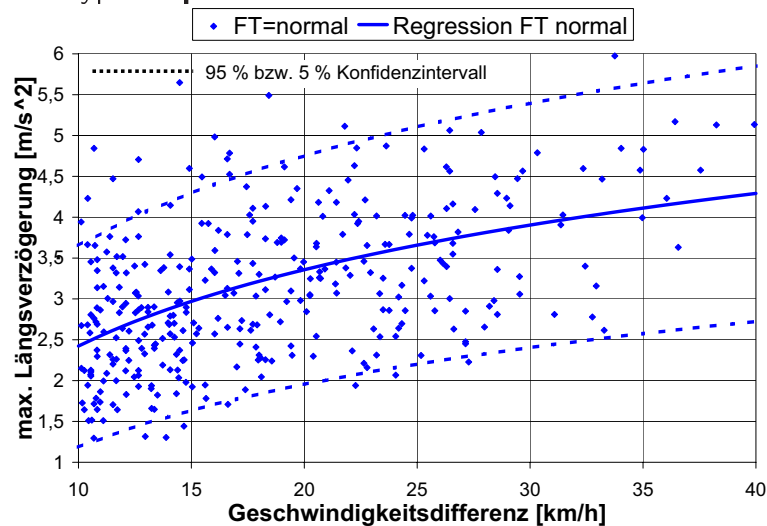


Abb. 62: Zusammenhang maximale Längsverzögerung - Geschwindigkeitsdifferenz für den Fahrertyp **normal**

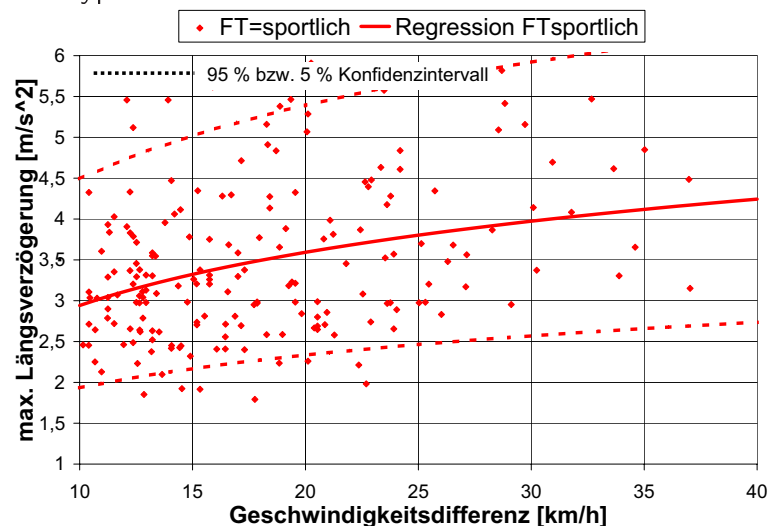


Abb. 63: Zusammenhang maximale Längsverzögerung - Geschwindigkeitsdifferenz für den Fahrertyp **sportlich**

m/s^2 zu beobachten. Diese steigt mit zunehmender Geschwindigkeitsdifferenz und nähert sich asymptotisch einem Maximalwert. Für den Fahrertyp sportlich wurden mittlere Verzögerungen bis $1,1 m/s^2$, für den normalen Fahrer $1,0 m/s^2$ und für den entspannten Fahrer ca. $0,8 m/s^2$ gemessen.

Die ermittelten Maximalwerte der Verzögerung liegen zwischen $2 m/s^2$ und $4,5 m/s^2$. Bei geringen Geschwindigkeitsdifferenzen unterscheiden sich die Maximalwerte der Verzögerung für die Fahrertypen deutlich von einander. Dies bedeutet, dass der sportliche Fahrstil bei geringen Geschwindigkeitsdifferenzen in der Längsbeschleunigung erkennbar ist.

Mit zunehmender Geschwindigkeitsdifferenz nähern sich die Kurven für den sportlichen und normalen Fahrertyp asymptotisch dem Wert von $4,5 \text{ m/s}^2$ an. Der entspannte Fahrer erreicht maximale Verzögerungen von bis zu $3,5 \text{ m/s}^2$ und liegt damit deutlich unter dem Fahrertypen normal und sportlich.

mittlere Verzögerung			
	sportlich	normal	entspannt
$K_{95\%}$	$a = 0,47 \cdot \ln(\Delta V) + 0,06$	$a = 0,41 \cdot \ln(\Delta V) - 0,03$	$a = 0,31 \cdot \ln(\Delta V) + 0,02$
\bar{M}	$a = 0,36 \cdot \ln(\Delta V) - 0,28$	$a = 0,33 \cdot \ln(\Delta V) - 0,25$	$a = 0,25 \cdot \ln(\Delta V) - 0,10$
$K_{5\%}$	$a = 0,24 \cdot \ln(\Delta V) - 0,61$	$a = 0,25 \cdot \ln(\Delta V) - 0,47$	$a = 0,20 \cdot \ln(\Delta V) - 0,29$
Anzahl	191	348	438
R^2	0,16	0,17	0,16

maximale Verzögerung			
	sportlich	normal	entspannt
$K_{95\%}$	$a = 1,90 \cdot \ln(\Delta V) + 1,81$	$a = 1,58 \cdot \ln(\Delta V) + 0,00$	$a = 1,15 \cdot \ln(\Delta V) + 0,42$
\bar{M}	$a = 0,51 \cdot \ln(\Delta V) + 0,78$	$a = 1,34 \cdot \ln(\Delta V) - 0,68$	$a = 0,97 \cdot \ln(\Delta V) - 0,10$
$K_{5\%}$	$a = 0,32 \cdot \ln(\Delta V) - 0,26$	$a = 1,11 \cdot \ln(\Delta V) - 1,37$	$a = 0,79 \cdot \ln(\Delta V) - 0,62$
Anzahl	191	348	438
R^2	0,12	0,26	0,20

$K_{95\%}$: 95% Konfidenzintervall, \bar{M} : Regressionsfunktion, $K_{5\%}$: 5% Konfidenzintervall, V : Geschwindigkeitsdifferenz km/h

Tab. 17: Funktionen für den maximale Längsverzögerung und mittlere Längsverzögerung in Abhängigkeit von der Geschwindigkeitsdifferenz

6.3.2.2 Einfluss der Ausgangsgeschwindigkeit

Der Einfluss der Annäherungsgeschwindigkeit auf die Größe der mittleren Längsverzögerung ist in Abb. 64 dargestellt. Zu erkennen ist, dass mit zunehmender Annäherungsgeschwindigkeit die mittlere Bremsverzögerung abnimmt. Dieser Effekt ist bei allen Fahrertypen erkennbar.

Vermutlich scheuen Fahrer bei hohen Geschwindigkeiten sehr starke Beschleunigungen. Dies deckt sich mit den Ergebnissen der Auswertung von der maximalen Querbeschleunigung (Kap. 6.3.1), wo ebenfalls die größten Beschleunigungen bei geringen Geschwindigkeiten gemessen wurden. Mit zunehmender Geschwindigkeit nimmt die „Vorausschau“ des Fahrers zu.

Die statistischen Sicherheiten sind bei dieser Auswertung sehr gering (ca. 0,1). Die Streuung der Werte ist auch auf unterschiedliche Sichtbedingungen zurückzuführen. Ist es dem Fahrer möglich, eine Kurve rechtzeitig zu erkennen, wird er sein Fahrverhalten entsprechend anpassen. Bei den vorliegenden Messungen ist teilweise davon auszugehen, dass der Beginn der Verzögerung mit der erstmaligen Sichtbarkeit der Kurve bzw. Singularität

identisch ist. Der Einfluss lässt sich mathematisch beschreiben.

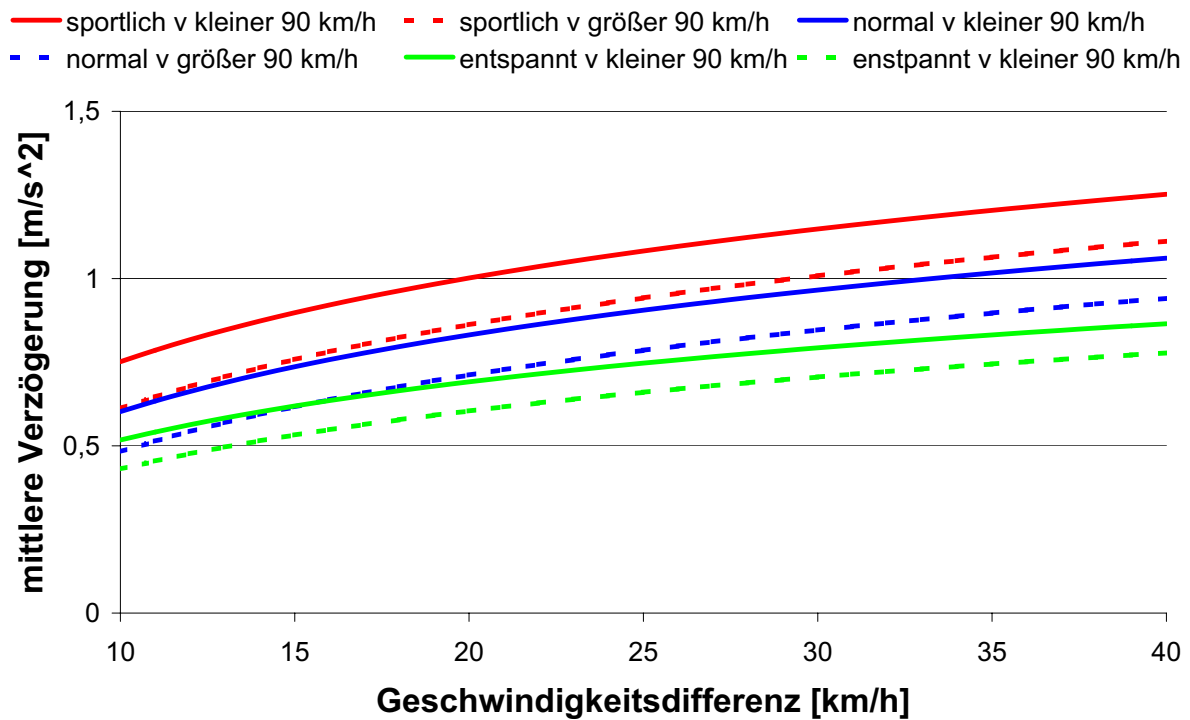


Abb. 64: Auswirkungen unterschiedlicher Annäherungsgeschwindigkeiten auf die mittlere Längsverzögerung

6.3.2.3 Einfluss der Kurvengeometrie

Weitere Einflüsse auf das Längsverzögerungsverhalten sind in der Geometrie der Straße zu vermuten. Untersucht wurden:

- der Richtungsänderungswinkel einer Kurve und
- das Vorhandensein eines Übergangsbogens in Zusammenhang mit dem Längsverzögerungsverhalten.

Die Ergebnisse sind in den Abb. 65 und 66 dargestellt.

Für den Richtungsänderungswinkel konnten keine Auswirkungen auf die Längsverzögerung nachgewiesen werden. Bei dem Fahrertyp sportlich war mit größer werdendem Richtungsänderungswinkel ein geringfügiger Anstieg der mittleren Verzögerung zu beobachten ($R=0,29$). Es kann nur vermutet werden, dass die Fahrer bei Erkennen großer Richtungsänderungen den Bremsvorgang verstärken. Für den Fahrertyp normal liegen die Daten übereinander. Dies bedeutet, der Richtungsänderungswinkel besitzt keinen Einfluss. Für den Fahrertyp entspannt war ein gegensätzliches Verhalten zum Fahrertyp sportlich zu beobachten. Mit größer werdendem Richtungsänderungswinkel nimmt die mittlere Längsverzögerung ab (Abb. 65, $R=0,18$). Dies kann ggf. damit begründet werden, dass bei rechtzeitigem Erkennen der Kurve wegen der großen Richtungsänderung der Bremsvorgang eher eingeleitet wird.

Das Vorhandensein eines Übergangsbogens hat nachweisbare Auswirkungen auf die Größe der Längsverzögerung. Befindet sich eine Klothoide vor einer Kurve, sind die Längsverzögerungen geringer als ohne Übergangsbogen. Dieser Einfluss lässt sich für alle drei Fahrertypen nachweisen (Abb. 66). Bei Vorhandensein eines Übergangsbogens ist die Richtungsänderung für den Kraftfahrer besser sichtbar. Er leitet somit die notwendige Geschwindigkeitsreduzierung eher ein. Dies bedeutet im Umkehrschluss, dass der Fahrer die Kurve ohne Übergangsbogen erst später wahrnimmt und somit auch erst später sein Fahrverhalten anpasst. Dies deckt sich mit den Ergebnissen der Literatur, dass bei modern trassierten Strecken geringe Beschleunigungen gemessen werden.

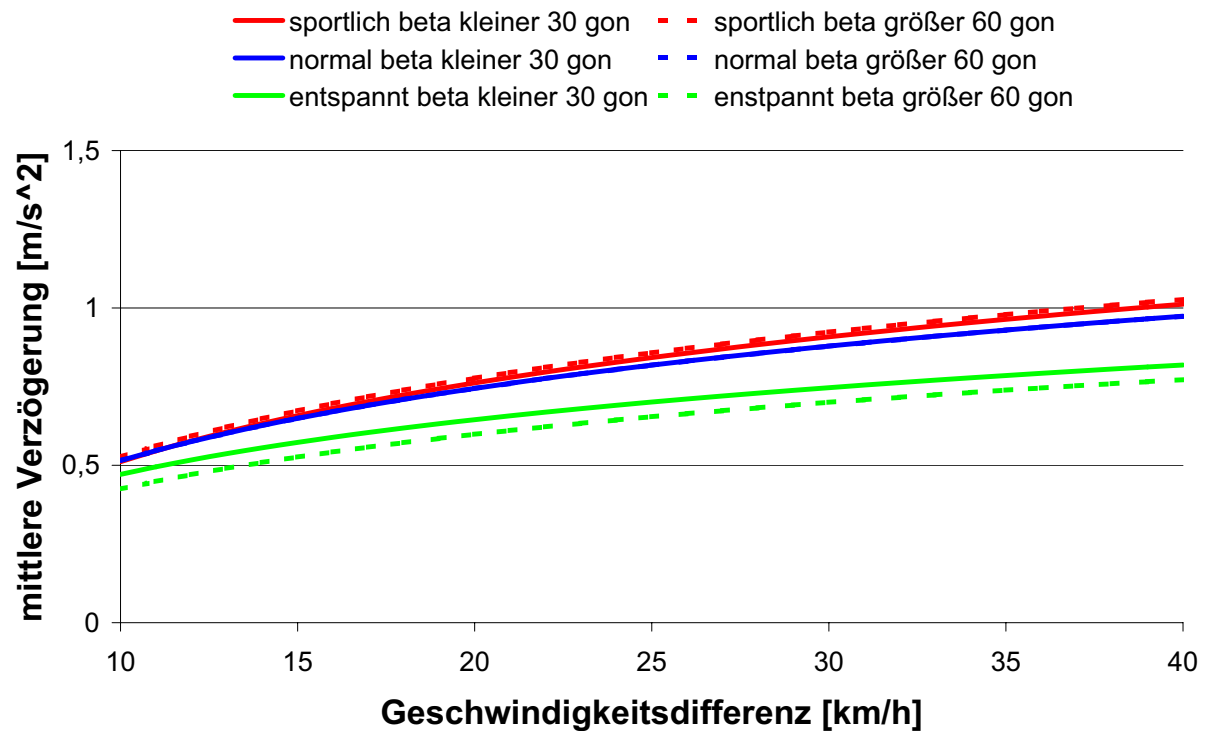


Abb. 65: Auswirkungen unterschiedlicher Richtungsänderungswinkel auf die mittlere Längsverzögerung

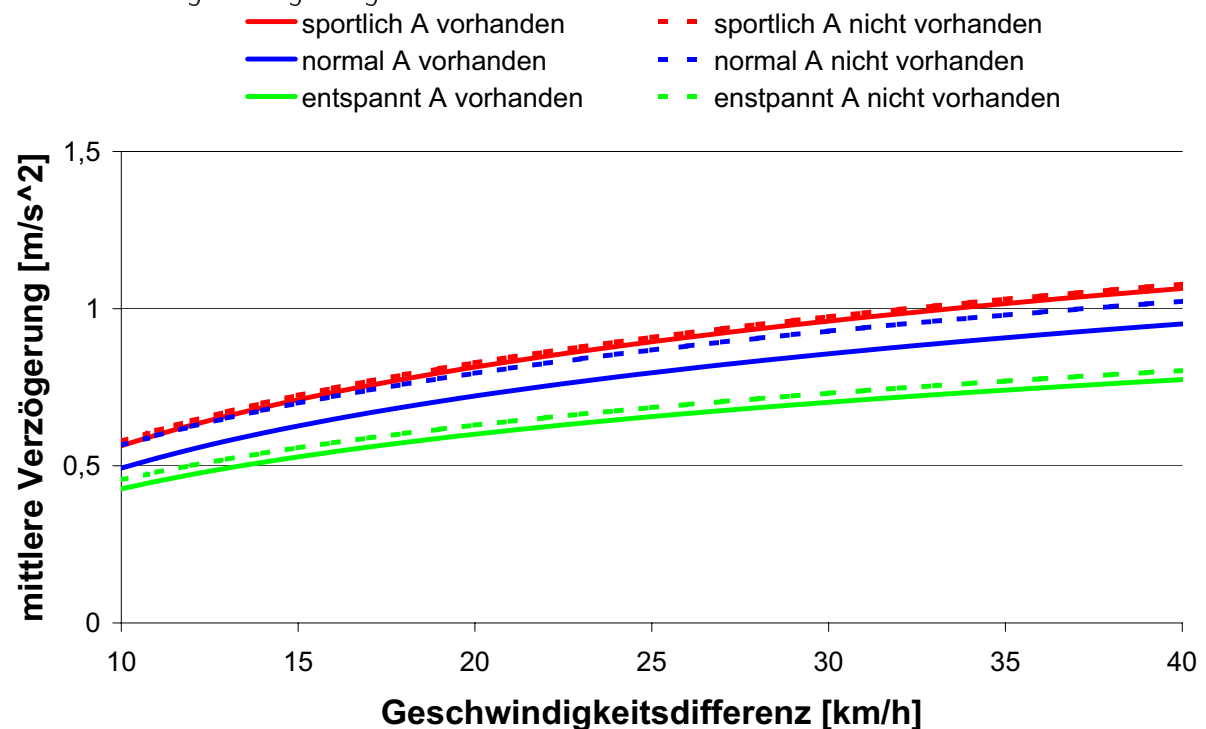


Abb. 66: Auswirkungen des Vorhandenseins eines Übergangsbogens auf die mittlere Längsverzögerung

6.3.3 Schlussfolgerungen für die Beschleunigungsprognose

Die den Fahrertypen zugeordneten Einzelprofile wurden hinsichtlich der aufgetretenen Längs- und Querbeschleunigungen ausgewertet. Die vom Fahrer akzeptierte **Querbeschleunigung** beim Durchfahren einer Kurve ist vom Fahrertyp und der Geometrie abhängig. Mit größer werdendem Radius und somit zunehmender Geschwindigkeit sinkt die Querbeschleunigung. Dieser Effekt ist bei allen Fahrertypen zu beobachten. Die größten Querbeschleunigungen treten bei kleinen Radien und somit geringen Geschwindigkeiten auf. Im unteren Radienbereich ($R < 100m$) sind deutliche Unterschiede in der akzeptierten Querbeschleunigung zwischen den Fahrertypen vorhanden. Während der Fahrertyp sportlich bei geringen Geschwindigkeiten Querbeschleunigungen von bis zu $7m/s^2$ akzeptiert, wurden bei dem Fahrertyp entspannt Werte von maximal $4,5m/s^2$ gemessen.

Das **Längsverzögerungsverhalten** ist vom Fahrertyp und der Geschwindigkeitsdifferenz abhängig. Je höher die Geschwindigkeitsdifferenz, desto höher sind die mittleren und maximalen Längsverzögerungen. Die statistischen Sicherheiten für die ermittelten Funktionen sind gering. Dies ist zum Einen mit der gewählten Aufnahmemethodik (Verfolgungsfahrten, siehe Kap. 5.3.2.1) und zum Anderen mit weiteren, unbekannten Einflussgrößen zu erklären. Für alle Fahrertypen wurde beobachtet, dass mit zunehmender Ausgangsgeschwindigkeit die Längsverzögerungen abnehmen. Es zeigt sich, dass Fahrer bei höheren Geschwindigkeiten große Beschleunigungen meiden. Ein Einfluss des Richtungsänderungswinkels auf die Längsverzögerung konnte nicht festgestellt werden. Ist ein Übergangsbogen vorhanden und somit die Kurve für den Fahrer eher sichtbar, wurden geringere Längsverzögerungen erreicht als bei Kurven ohne Übergangsbogen. Ein Modell zur Prognose des Längsverzögerungsverhaltens wird im nächsten Kapitel vorgestellt.

6.3.4 Längsverzögerungsmodell

Die Verzögerung vor einer Kurve hängt von den Größen:

- Fahrertyp,
- Geschwindigkeitsdifferenz,
- Ausgangsgeschwindigkeit und
- Geometrie der Kurve

ab. Als Grundgröße wird eine mittlere Verzögerung in Abhängigkeit von der Geschwindigkeitsdifferenz (siehe Tab. 17) berechnet. Mit größer werdender Ausgangsgeschwindigkeit nimmt die mittlere Längsverzögerung ab. Als maximale Abminderung wird ein Wert von $0,15 m/s^2$ bei einer Geschwindigkeit von $110 km/h$ angesetzt. Bei einer Ausgangsgeschwindigkeit von $70 km/h$ wird die Verzögerung nicht mehr verringert. Ist vor einer

Kurve kein Übergangsbogen vorhanden, wird abhängig vom Fahrertyp die mittlere Längsverzögerung um einen konstanten Betrag erhöht. Die mittleren Beschleunigungen lassen sich nach den in Tab. 18 angegebenen Formeln berechnen.

	entspannt	normal	sportlich
	$a_{mittel} = a \cdot \ln(\Delta V) + b + x$		
a_{mittel} (a)	+0,25	+0,33	+0,36
a_{mittel} (b)	-0,10	-0,25	-0,28
Einfluss der Ausgangsgeschwindigkeit			
$V_A > 70 \text{ und } V_A < 110 \text{ km/h}$	$x = 0,0375 \cdot V_A - 0,0262$		
$V_A \leq 70 \text{ km/h}$	x=0		
Einfluss des Übergangsbogens			
ÜB nicht vorhanden	x=0,09	x=0,01	x=0,08
ÜB vorhanden	x=0	x=0	x=0

V_A : Ausgangsgeschwindigkeit in km/h

Tab. 18: Einflüsse unterschiedlicher Parameter auf die Geschwindigkeit in Abhängigkeit vom Fahrertyp

6.4 Zusammenfassung

Entsprechend der Zielstellung wurden ein Geschwindigkeits- und ein Beschleunigungsmodell für die Fahrertypen sportlich, normal und entspannt entwickelt. Grundlage waren die Daten von 922 gemessenen Einzelprofile aus Verfolgungsfahrten sowie 15 Messstellen aus Querschnittsmessungen. Anhand des Kriteriums maximale Querbesehleunigung konnten die Messdaten den Fahrertypen zugeordnet werden.

In jedem Einzelprofil wurde nach Abschnitten ähnlicher Streckencharakteristik und Singularitäten gesucht und die zugehörigen charakteristischen Geschwindigkeiten ermittelt. Diese Daten bildeten die Grundlage der statistischen Auswertung zur Untersuchung verschiedener Geometrieparameter auf das Fahrverhalten in Abhängigkeit des Fahrertyps. Es konnte nachgewiesen werden, dass in Abhängigkeit vom Fahrertyp unterschiedliche große Einflüsse auf die Geschwindigkeit vorhanden sind.

Das Modell für Singularitäten basiert auf dem ermittelten Zusammenhang Radius - Geschwindigkeit. Weitere Einflussfaktoren (z.B. Nässe etc.) können berücksichtigt werden. Sind diese nicht verfügbar (z.B. Regensensor defekt oder Variable nicht berechnet), kann dennoch eine Geschwindigkeitsprognose erfolgen. Das Modell liefert plausible Werte und ist offen für weitere Parameter.

Die Messergebnisse für Abschnitte ähnlicher Streckencharakteristik sind differenziert zu bewerten. Für Abschnitte mit geringen Kurvigkeiten waren die Ergebnisse unplausibel. Für diesen Bereich lagen zu wenige Messdaten vor. Diese Strecken wurden nicht mit in das Messkollektiv einbezogen, da auf diesen Strecken die Geschwindigkeit nicht maßgeblich durch die Geometrie beeinflusst wird. Zudem ist die gewählte Methode der Auswertung (nahezu konstante Geschwindigkeit über eine Strecke von mindestens 400 m) in Frage zu stellen. In den Bereichen gestreckter Linienführungen (geringer Kurvigkeit) wurde das Modell in Anlehnung an Ergebnisse vorausgegangener Forschungsarbeiten angepasst.

Mit Hilfe der beiden Modelle kann an jeder Stelle eines Streckenabschnittes (nach erfolgter Abschnittseinteilung) eine Geschwindigkeit in Abhängigkeit des Fahrertyps berechnet werden. Zur Modellierung der dazwischen liegenden Längsverzögerungen wurden diese in den Messdaten ebenfalls analysiert. Die Zusammenhänge Fahrertyp / Längsverzögerung waren gering. Das ist auf die gewählte Messmethodik zur Erfassung der Einzelprofile zurückzuführen (siehe Kap. 5.4.3). Dennoch wurden Tendenzen deutlich, die Rückschlüsse über die Einflüsse auf das Verzögerungsverhalten erlauben. Diese Einflüsse wurden zusammengefasst in einem Längsverzögerungsmodell beschrieben.

Auf Grundlage der ermittelten Modelle war es möglich, das Geschwindigkeits- und Beschleunigungsverhalten für einen Streckenabschnitt zu prognostizieren (Abb. 67).

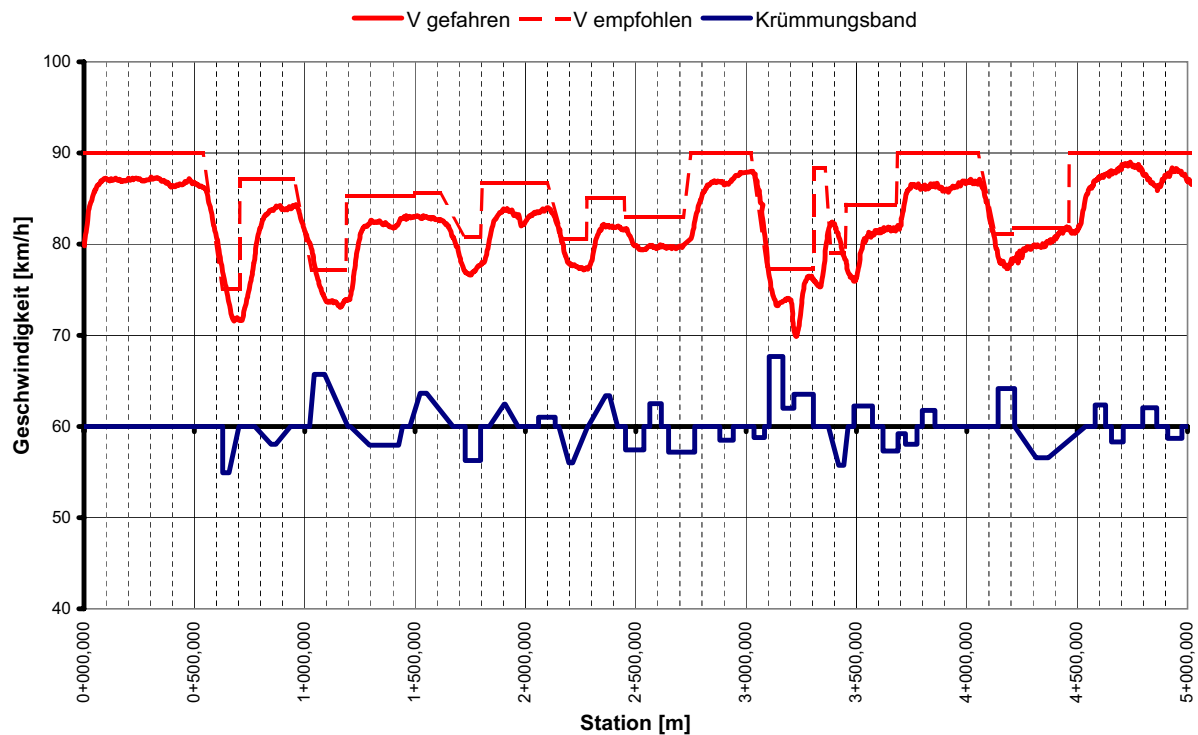


Abb. 67: Beschreibung des Geschwindigkeits- und Beschleunigungsverhaltens

Zur Kontrolle der berechneten Geschwindigkeiten wurden zusätzlich die Querbeschleunigungen analysiert. Es wurde für alle Fahrertypen beobachtet, dass sie mit zunehmender Geschwindigkeit abnimmt. Dies bedeutet, je höher die Geschwindigkeit, desto geringere Querbeschleunigungen werden vom Fahrer akzeptiert. Akzeptieren sportliche Fahrer bei geringen Geschwindigkeiten (50 km/h) noch Beschleunigungen von bis zu 6 m/s^2 sinkt diese auf 3 m/s^2 bei Geschwindigkeiten von 100 km/h ab. Für jeden Fahrertyp konnte ein charakteristischer Querbeschleunigungsbereich bestimmt werden.

Damit stehen jetzt alle erforderlichen Eingangsgrößen für eine praktische Umsetzung zur Verfügung. Dies ist im Rahmen dieser Arbeit erfolgt und wird in dem nachfolgenden Kapitel beschrieben.

7 Umsetzung und Validierung des SC - Systems

Das entwickelte Fahrerassistenzsystem Speed Control wurde in Fahrzeugen umgesetzt. Als Versuchsplattform standen Demonstratoren aus dem Projekt S.A.N.T.O.S (siehe Kap. 3.2) zur Verfügung.

In Abb. 68 ist der Regelkreis für das SC - System dargestellt. Die Datengrundlage für die Geschwindigkeitsempfehlung bildet die feindigitale Karte. Mit Hilfe eines integrierten DGPS - Sensors wird die aktuelle Position des Fahrzeuges bestimmt. Wie bei einem Navigationssystem wird durch einen map matching Algorithmus die ermittelte Position einem, in der digitalen Karte vorhandenen, Punkt und somit Streckenabschnitt zugeordnet. Sind die Position und die Fahrtrichtung bekannt, können die vorausliegenden Punkte ermittelt werden. Dies erfolgt durch die EDDAS Software (Schraut, Kohlhof 2002, Abb.68). Über eine Ethernetverbindung sendet die EDDAS Software die aktuelle Position auf der Straße und die vorausliegenden Streckenpunkte an das Fahrerassistenzsystem Speed Control (Abb. 68 unten). Die S.A.N.T.O.S Software (Abb. 68) übergibt die Parameter Fahrstilwunsch, Unterstützungswunsch, Geschwindigkeit und die Umgebungsbedingungen (Regen / Nässe, Nacht etc.) an das SC - System. Die SC - Software muss folgende Aufgaben ausführen:

- Bestimmung der Geometrie des vorausliegenden Streckenabschnittes aus der diskreten Punktfolge,
- Einteilung der vorausliegenden Strecke in Singularitäten und Abschnitte ähnlicher Streckencharakteristik,
- Berechnung einer Geschwindigkeitsempfehlung für jeden Streckenabschnitt und Singularität in Abhängigkeit von der Geometrie, des Tempolimits und des Fahrstilwunsches und
- Ermittlung des optimalen Warn- bzw. Bremszeitpunktes für die MMI Ausgabe (Vorausschau).

Das Ergebnis der Berechnung wird wieder an die S.A.N.T.O.S Software gesendet. Im Folgenden werden die einzelnen Schritte, beginnend mit der Erstellung der digitalen Karte, zur Umsetzung des Systems näher vorgestellt.

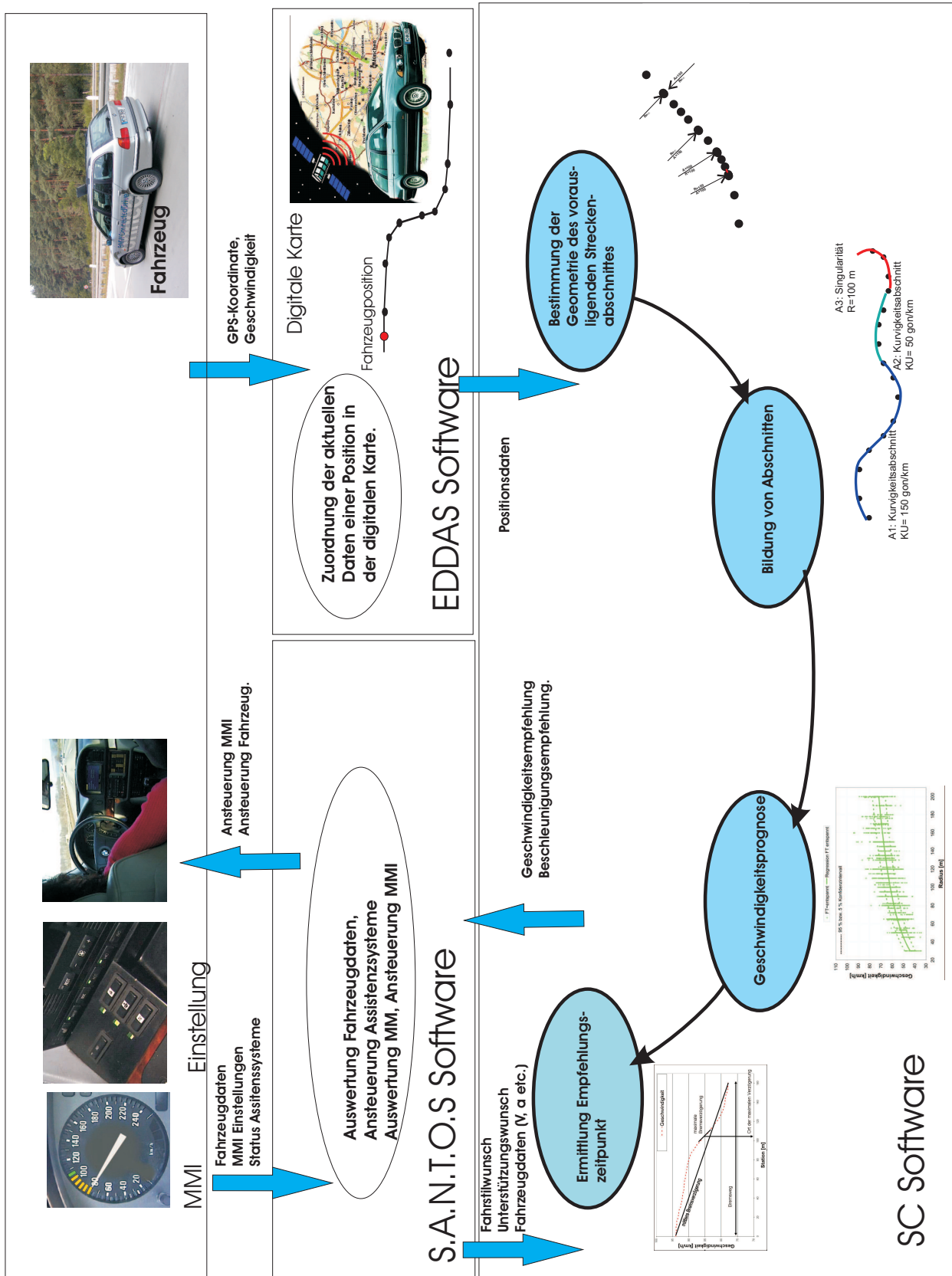


Abb. 68: Regelkreis des SC - Systems im S.A.N.T.O.S Demonstrator

7.1 Erweiterung der feindigitalen Karte

Die Genauigkeit vorhandener digitaler Karten ist für das SC System nicht ausreichend (siehe Kap. 3.5.3.1). Damit vorhandene Berechnungsverfahren von Navigationssystemen verwendet werden konnten, wurde eine digitale Karte von der Firma Navtech verwendet. Um die Genauigkeit zu verbessern, wurden Punkte verschoben und eingefügt. Für die in Abb. 69 rot dargestellten Streckenabschnitte lagen genaue Geometriedaten und die Elemente des Lageplanes (Achse) aus dem Projekt „Kinematische Vermessung“ (Lippold u.a. 2003) vor. Diese wurden für die Verbesserung der digitalen Karte verwendet.

Die Grundstruktur der Datenbank (shape related und Landmark Tabelle) ist durch die konventionelle digitale Karte vorgegeben. Die Geometrie der Strecken im Testgebiet ist aus der Nachtrassierung bekannt. Punkte auf der Straßenachse können mit einer sehr hohen relativen Genauigkeit berechnet werden. Eine Ermittlung der Elemente aus dem Krümmungsband ist dann möglich (Schulz 2002). Für die Erstellung der Karte wurden folgende Punkte zur Verbesserung der Datenbank ausgewählt:

- Geraden: 3 Punkte (Anfang, Mitte, Ende)
- Kreisbögen: 4 Punkte (Anfang, nach $\frac{1}{4}$ und $\frac{3}{4}$ der Kreisbogenlänge, Ende)
- Klothoiden: 4 Punkte (Anfang, nach $\frac{1}{4}$ und $\frac{3}{4}$ der Übergangsbogenlänge, Ende)
- Elementübergänge: zusätzlich je ein Punkt im 1 m Abstand

Für alle Strecken wurden aus den nachtrassierten Achsen die zu übernehmenden Punkte bestimmt, die Koordinaten berechnet und in einer Datenbank abgelegt. In Abb. 70 sind die Daten aus der konventionellen digitalen Karte und die zusätzlich abzuspeichernden Punkte dargestellt. Die Ordnung der Daten erfolgt anhand der Segmente und Shapes (siehe Kap. 3.5.3.1). Die Erzeugung der feindigitalen Karte erfolgte softwaregestützt in zwei Schritten:

1. Korrektur der Koordinaten der konventionellen digitalen Karte auf den nächstliegenden Achskleinpunkt,
2. Einfügen der Zwischenpunkte.

Das Ergebnis ist in Abb. 71 dargestellt. Aus dieser digitalen Karte kann die Geometrie online berechnet werden. Die Ablage der Punkte (Shape Points) erfolgte in der Zusatzdatenbank in der Tabelle shape related. Vorhandene Verkehrszeichen wurden ebenfalls in die Datenbank aufgenommen. Die Abspeicherung erfolgte in der Tabelle Landmarks. Zu jedem Punkt der Karte konnten Verkehrszeichen in folgender Form :

- Typ des Verkehrszeichens,
- Abstand vom Punkt (Offset) und
- Richtung (aufsteigende Shapes oder absteigende Shapes)

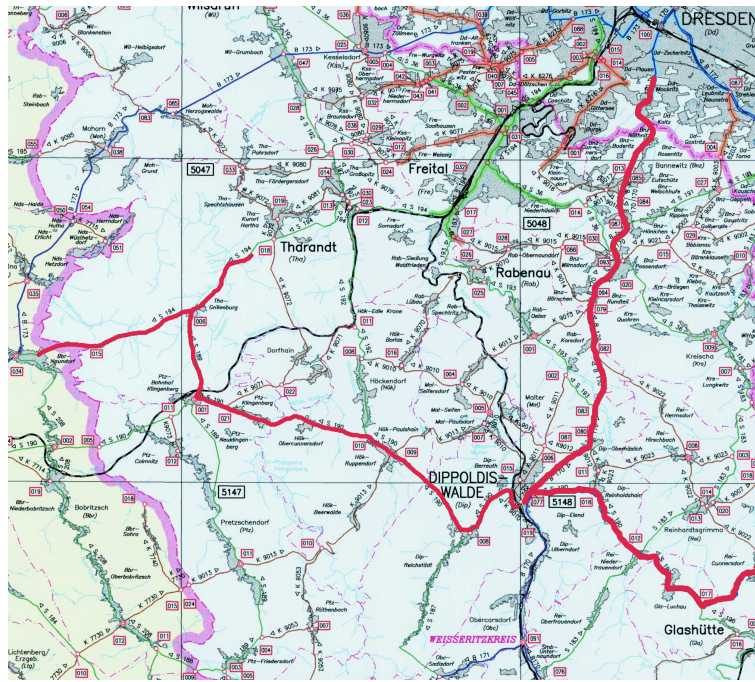


Abb. 69: Strecken für die feindigitale Karte im Raum Sachsen

definiert werden. Die Positionen der Verkehrszeichen wurden vor Ort mit Hilfe eines GPS - Empfängers aufgenommen. Für den Raum Dresden wurde eine Zusatzdatenbank erstellt, in der ca. 150 km Außerortsstraßen enthalten sind. Von einigen Strecken war das Fahrverhalten durch Messungen bekannt (siehe Kap. 5.3.1). Auf Grundlage dieser Daten konnte das SC - System umgesetzt und getestet werden. In den nächsten Kapiteln erfolgt die Beschreibung der technischen Umsetzung der einzelnen Aufgaben der SC - Software (unterer Bereich in Abb. 68).

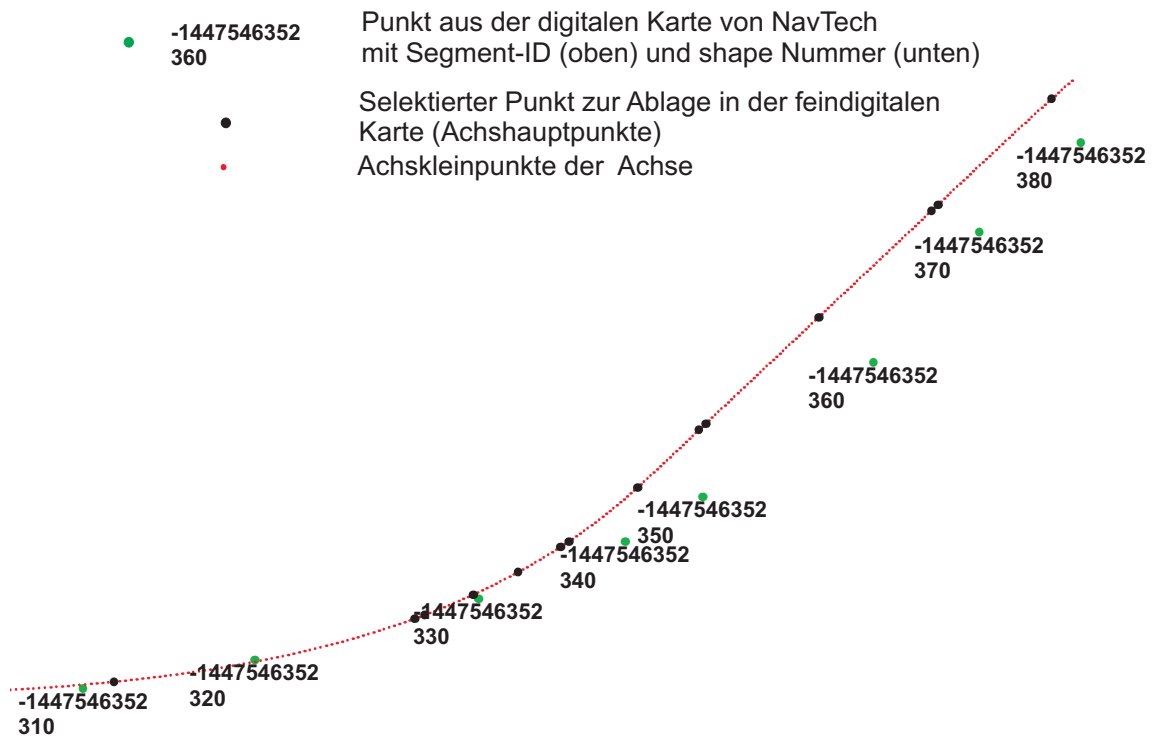


Abb. 70: Ausgangsdaten zur Erzeugung der digitalen Karte

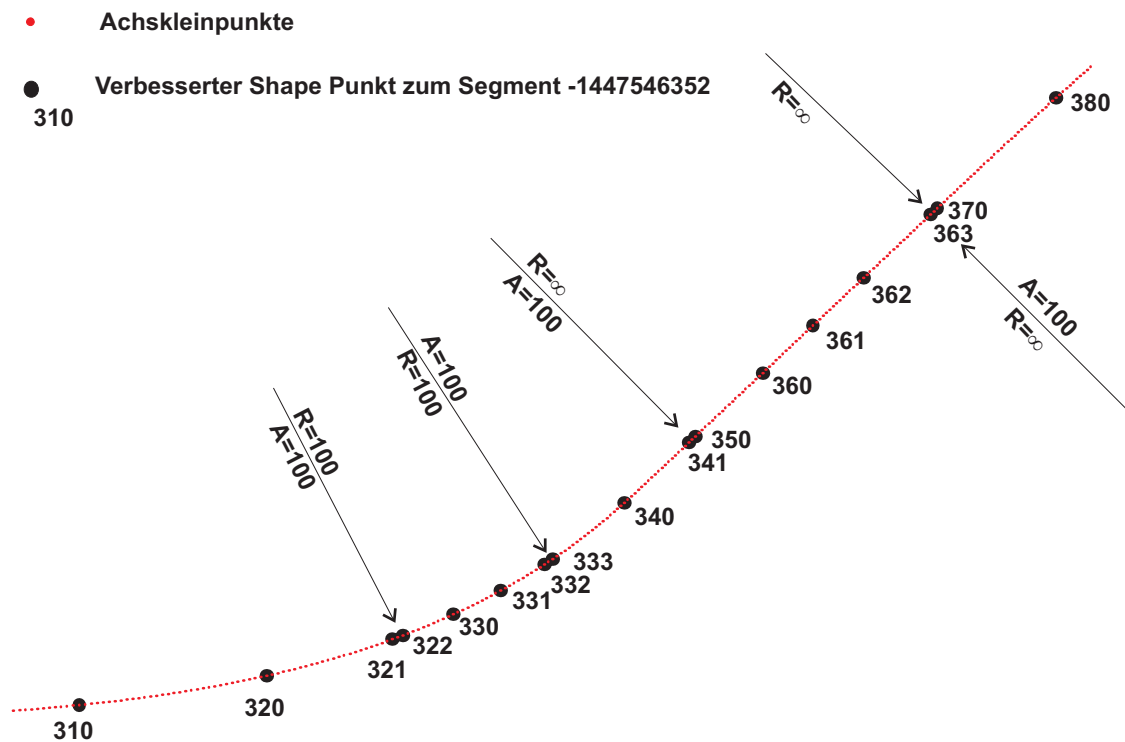


Abb. 71: fertige feindigitale Karte (Ausschnitt)

7.2 Entwicklung der SC - Software

Aus den Informationen der EDDAS Software und der S.A.N.T.O.S Software muss das SC - System eine Geschwindigkeits- und Beschleunigungsempfehlung berechnen. Diese wird über eine Ethernetverbindung wieder an S.A.N.T.O.S gesendet und über ein integriertes Mensch - Maschine - Interface (MMI) an den Fahrer weitergeleitet. Das Funktionsprinzip ist in der Abb. 72 dargestellt. Eine Aktualisierung der Daten erfolgt aller 0,1 s. Dies bedeutet für das SC System, dass innerhalb dieser Zeit alle Daten berechnet werden müssen. Die Software wurde in Visual C++ erstellt.

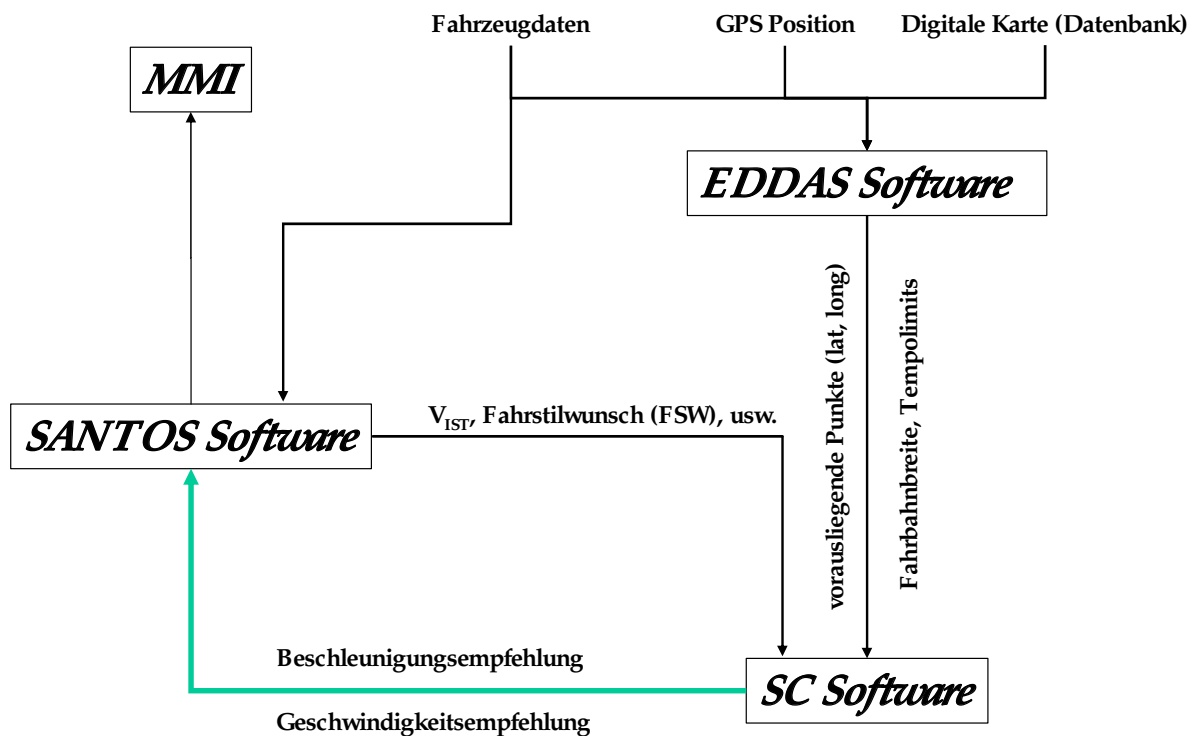


Abb. 72: Funktionsprinzip und Beziehungen der SC - Software in den S.A.N.T.O.S Demonstratoren

Der vorausliegende Streckenabschnitt wird als Punktfolge von der EDDAS - Software über eine Ethernetverbindung gesendet. Die S.A.N.T.O.S - Software stellt die Informationen über den gewählten Fahrstilwunsch, Unterstützungswunsch etc. ebenfalls über eine Ethernetverbindung bereit. Aus diesen Informationen müssen alle Daten berechnet werden (siehe Kap. 7).

7.2.1 Bestimmung der Lageplanelemente

Aus den empfangenen Daten zur Position des Fahrzeuges auf einem Streckenabschnitt müssen im ersten Schritt die straßenbautypischen Parameter berechnet werden. Die gesendeten Daten besitzen die in Tab. 19 dargestellte Struktur.

Wert	Beschreibung
Index	fortlaufende Punktnummerierung
Lat	Breitengrad des Punktes
Long	Längengrad des Punktes
Altitude	Höhe des Punktes
Val1 bis Val5	frei definierbare Werte in der Datenbank
past distance	Derzeitiger Abstand vom letzten überfahrenen Punkt

Tab. 19: Von EDDAS gesendete Daten zur Berechnung der Geschwindigkeiten

Wie aus der Tab. 19 zu entnehmen ist, werden die vorausliegenden Punkte mit geographischen Koordinaten (Länge und Breite) übergeben. Die Definition eines Punktes in diesem Koordinatensystem erfolgt durch die Angabe von zwei Winkeln (Lat, Long) bezogen auf einen Ursprung (Abb. 73). Um tatsächliche Längen und Winkel berechnen zu können, muss eine Transformation zu ebenen Koordinaten erfolgen. Zur Berechnung dieser Transformation sind mehrere mathematische Iterationen mit großem Rechenzeitaufwand notwendig. Die Software hat für einen gesamten Rechenzyklus nur 0,1 s Zeit. Aus diesem Grund sollten aufwendige mathematische Berechnungen und Iterationen vermieden werden. Die Entfernung zwischen zwei Punkten lässt sich über die Näherungsformeln nach Gl. 26 bis 30 berechnen (Abb. 74).

$$d_x = r_{Erde} \cdot d\lambda \quad (26)$$

$$d_y = r_{Erde} d\varphi \cdot \cos(\lambda_1) \quad (27)$$

$$d\lambda = \lambda_1 - \lambda_2 \quad (28)$$

$$d\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 \quad (29)$$

$$d = \sqrt{d_x^2 + d_y^2} \quad (30)$$

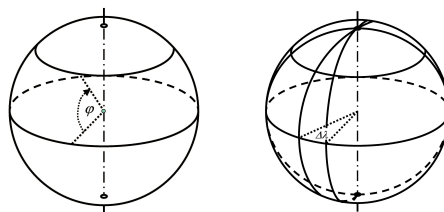


Abb. 73: Beschreibung eines Punktes durch geographische Koordinaten (Latitude und Longitude)

Bei dieser Berechnung wird angenommen, dass sich der Erdradius zwischen zwei Punkten nicht ändert (Abb. 74). Der Fehler ist bis zu einer Punktentfernung von 2000 m zu vernachlässigen (Schraut 2000).

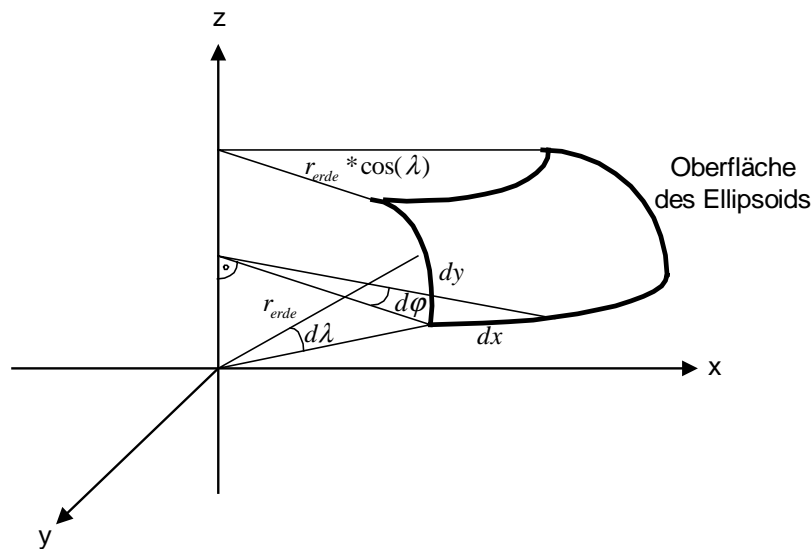


Abb. 74: Anwendung vereinfachte Transformation Schraut (2000)

Für die durchzuführenden Berechnungen aus der feindigitalen Karte ist von Punktabständen in langgestreckten Bereichen von maximal 100 m auszugehen. In stark kurvigen Bereichen liegt dieser deutlich unter 50 m. Die Berechnung der ebenen Koordinaten mittels der vereinfachten Formel ist somit möglich (Abb. 74). Für jeden Punkt P_i wird der Abstand dx und dy zum vorausliegenden P_{i-1} und nachfolgenden Punkt P_{i+1} nach den Gl. 26 bis 30 berechnet. Mit Hilfe dieser zwei Hilfspunkte (P_{i-1} und P_{i+1}) lässt sich an dem Berechnungspunkt P_i ein Kreisbogenradius aus 3 Punkten (P_i, P_{i+1}, P_{i-1}) über eine Schmiegekreiskonstruktion (Abb. 75) berechnen.

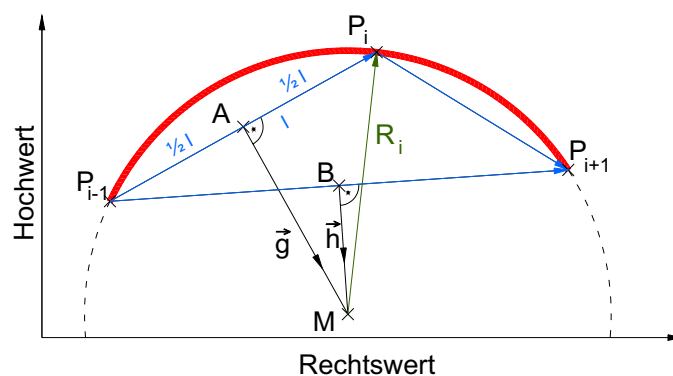


Abb. 75: Geometrie im Kreis Schulz (2002)

Für jeden Punkt des vorausliegenden Streckenabschnittes erfolgt diese Berechnung. Bereits geringe Fehler in der relativen Lage der Punkte führen zu Fehlern bei der Radiusberechnung (Schulz 2002). Um diesen Einfluss zu minimieren, wird das Krümmungsband geglättet. Dies erfolgt nach folgendem Schema:

1. Berechnung des Krümmungsunterschiedes ΔK zwischen dem Punkt P_i und P_{i-1} .
2. Ist der Krümmungsunterschied ΔK geringer als das gesetzte Glättungskriterium K_{krit} , wird die Krümmung des Punktes P_{i-1} für den aktuellen Punkt übernommen.

Als Glättungskriterium wurde eine Radiendifferenz von 5 m angesetzt. Mit diesem Wert war sicher gestellt, dass die Radien ausreichend genau bestimmt wurden. Durch einen Vergleich der Krümmungen lassen sich die Elemente selektieren. Durch Ungenauigkeiten in der digitalen Karte und Transformation wird für jeden Punkt (auch im Bereich der Geraden) ein Radius ermittelt. Es muss somit ein Grenzradius vorgegeben werden, bei dem von einer Geraden ausgegangen werden kann. Der Wert wurde mit max_R bezeichnet und lässt sich ebenfalls variabel einstellen. Bei Tests hat sich ein Grenzradius von 800 m bewährt. Die genaue Definition zur Bestimmung der einzelnen Elemente ist aus der Anlage 3 ersichtlich. Am Ende der Elementbestimmung liegt für jeden Punkt ein Elementtyp vor. Durch die gewählte Berechnungsmethode war es möglich, dass für jeden Punkt eines Kreisbogens ein unterschiedlicher Radius berechnet werden konnte. Eine Kurve kann auch aus mehreren Elementen bestehen (z. B. Verbundkurve). Als Eingangsgröße für die Geschwindigkeitsmodelle müssen diese aber zu einer Kurve zusammengefasst werden. Folgende Elementkombinationen werden hierfür zusammengefasst:

- Gerade - Gerade zur Geraden,
- Kreisbogen - Kreisbogen zum Kreisbogen,
- Einleitende Klothoide - Kreisbogen zur Verbundkurve,
- Kreisbogen - Ausleitende Klothiode zur Verbundkurve und
- Einleitende Klothiode - Ausleitende Klothoide zur Scheitleklothiode.

Für den Radius der Verbundkurve wird immer der kleinste im Element vorhandene Radius verwendet. Nach dieser Reduktion stehen die im Straßenentwurf üblichen Elementkombinationen für eine Abschnittsbildung zur Verfügung.

7.2.2 Bildung von Abschnitten

Die Abschnittseinteilung verwendet die aus der Reduktion ermittelten Elemente. Der Algorithmus geht dabei in zwei Stufen vor:

1. Prüfung auf Singularitäten,
2. Zusammenfassen der verbleibenden Strecken zu Abschnitten.

In der ersten Stufe werden alle vorhandenen Elemente darauf geprüft, ob sie der Bedingung einer Singularität genügen. Damit eine Singularität definiert werden kann, müssen zwei Kriterien erfüllt sein:

1. der Radius des Elementes muss kleiner als ein minimaler Radius (R_{Sing}) sein und
2. das Element muss eine Mindestlänge (L_{Sing}) besitzen.

Damit ein Element das Kriterium einer Singularität erfüllt, wurde ein Radius von $R_{Sing} \leq 200m$ angesetzt. Bei diesem Wert findet eine deutliche Anpassung der Geschwindigkeit auf Grund der Streckengeometrie statt. Als Mindestlänge wurde ein Wert $L_{Sing} \geq 50m$ verwendet. Bei kleineren Elementlängen wird durch „schneiden“ der Kurve im eigenen Fahrstreifen ein so großer Radiengewinn erzielt, dass keine Anpassung der Geschwindigkeit mehr erfolgt (siehe Kap. 4.1.2, Abb. 21). In dem vorausliegenden Streckenabschnitt werden die entsprechenden Elemente als Singularitäten gekennzeichnet. Für die restlichen Teilstücke müssen im zweiten Schritt Abschnitte ähnlicher Streckencharakteristik bestimmt werden. Dies erfolgt in zwei Stufen nach den Kriterien Länge und Richtungsänderung. Mit dieser Methode werden sehr viele Abschnitte gebildet. Folgen zum Beispiel mehrere Radien mit ähnlicher Größe, aber mit einem Radius kleiner R_{Sing} , werden diese als einzelne Singularitäten behandelt. Um dies auszuschließen, werden die so ermittelten Abschnitte in einer zweiten Stufe optimiert. Diese Abschnitte sind so zusammenzufassen, dass sie eine einheitliche Streckencharakteristik aufweisen. Dies ist u.a. dann der Fall, wenn:

- mehrere gefundene Singularitäten mit ähnlichem Radius aufeinander folgen oder
- aufeinanderfolgende Abschnitte ähnlicher Streckenchrakteristik eine ähnliche Kurvigkeit besitzen.

Dies erfolgt in einer zweiten Stufe. Die genauen Definitionen zur Abschnittseinteilung sind in Anlage 4 enthalten.

7.2.3 Geschwindigkeitsprognose

Die Geschwindigkeitsprognose erfolgt nach dem in Kap. 4 beschriebenen Modell. Der Fahrstilwunsch, der Unterstützungswunsch, die aktuelle Geschwindigkeit und die Umgebungsbedingungen werden von der S.A.N.T.O.S Software an die SC - Software gesendet. Auf Grundlage dieser Informationen kann für jeden vorausliegenden Streckenabschnitt eine Geschwindigkeit berechnet werden.

7.2.4 Vorausschau

Für jeden Punkt des vorausliegenden Streckenabschnittes kann auf Grundlage des gewählten Fahrstilwunsches, der Umgebungsbedingungen, der Abschnittseinteilung und des Geschwindigkeitsmodells eine Geschwindigkeit zugeordnet werden. Die aktuelle Geschwindigkeit wird von der S.A.N.T.O.S Software an die SC - Software gesendet. Fährt der Kraftfahrer auf einen Streckenabschnitt zu, bei der eine geringere Geschwindigkeit empfohlen wird als seine derzeitige, muss er rechtzeitig darüber informiert werden. Der Zeitpunkt des Eingreifens bzw. der Warnung durch das System ist unterschiedlich. Will der Fahrer nur informiert werden, muss das System eher eine Reaktion durchführen, da der Kraftfahrer eine gewisse Wahrnehmungs- und Reaktionszeit benötigt. Regelt das Fahrzeug selbstständig die Geschwindigkeit, muss die neue Wunschgeschwindigkeit so gesetzt werden, dass die Zielgeschwindigkeit genau am Beginn des neuen Abschnittes erreicht ist. Der Empfehlungs- bzw. Reaktionszeitpunkt kann mit Hilfe des Längsbeschleunigungsmodells (Kap. 6.3.4) berechnet werden. Die Parameter Fahrstilwunsch (sportlich, normal, entspannt) sowie die aktuelle Geschwindigkeit beeinflussen den Reaktionsort. Im aktuellen Demonstrator war aus technischen Gründen eine softwaremäßige dynamische Anpassung der Beschleunigung nur bedingt möglich. Der Bremsverlauf lässt sich in vier verschiedene Phasen einteilen:

1. Reglertotzeit,
2. Aufbau der Verzögerung,
3. konstante Verzögerung und
4. Abbau der Verzögerung.

In Abb. 76 sind die einzelnen Phasen einer Verzögerung über den Weg dargestellt. Im Regelungsmodus wurde an das ACC - System eine neue Wunschgeschwindigkeit übergeben. Dies ist identisch damit, dass ein Fahrer eine gespeicherte Geschwindigkeit aufruft (Resume Taste). Das Fahrzeug sollte genau am Kurvenanfang die Zielgeschwindigkeit erreicht haben. Aus diesem Grund wurde ein einfacher Regler implementiert. Dieser passt die aktuelle Beschleunigung den aktuellen Gegebenheiten permanent an. Die Formeln zur Berechnung sind in Anlage 5 enthalten.

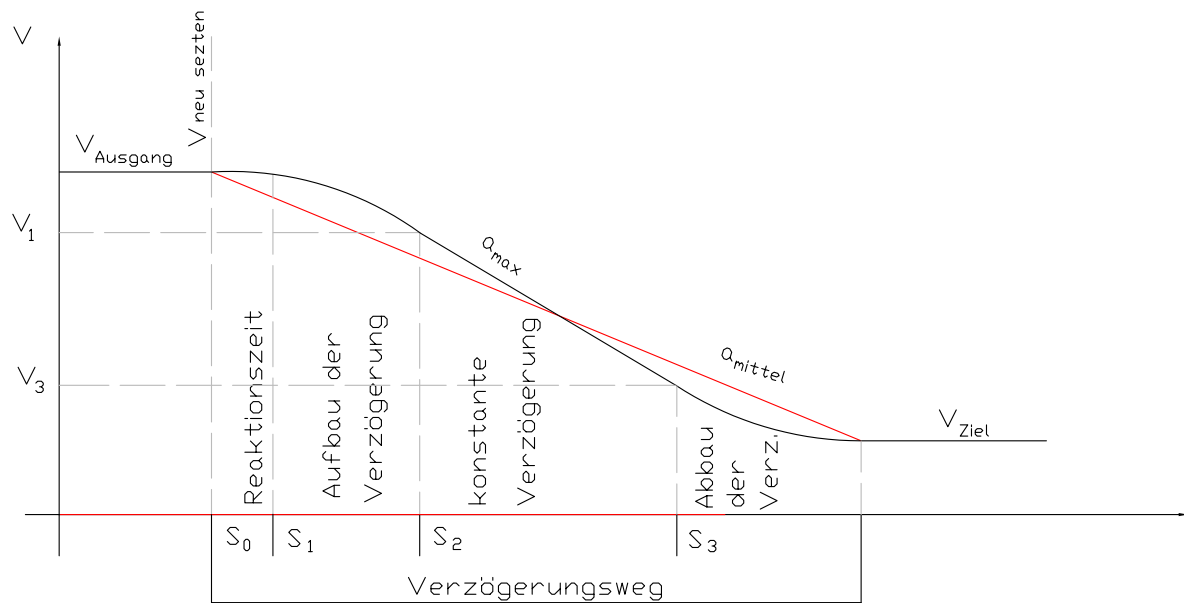


Abb. 76: Modell zur Beschreibung der Längsverzögerung (Regelungsmodus)

7.3 Probandenfahrten

7.3.1 Zielstellungen

Das entwickelte SC - System konnte in S.A.N.T.O.S Demonstratorfahrzeugen umgesetzt werden. Wie aus Abb. 77 ersichtlich, handelte es sich um Fahrzeuge der Oberklasse. Die zusätzliche Funktionalität (Wahl des Fahrstilwunsches und des Unterstützungswunsches, siehe Kap. 3.6) wurde durch zusätzliche Schalter in der Mittelkonsole realisiert. Die Steuerung und Regelung der Assistenzsysteme erfolgte durch eingebaute Computer im Kofferraum des Fahrzeuges (Abb. 78).

Für die Tests in Dresden stand ein BMW der Modellreihe sieben zur Verfügung. Mit Hilfe von Probandenfahrten sollten folgende Fragestellungen beantwortet werden:

1. Werden die empfohlenen Geschwindigkeiten vom Fahrer (abhängig vom gewählten Fahrstilwunsch) akzeptiert?
2. Werden die eingeregelter Längsbeschleunigungen vom Fahrer (abhängig vom gewählten Fahrstilwunsch) akzeptiert?
3. Wie wirkt sich die Unterstützungsform (Regelung oder Empfehlung) bei der Akzeptanz / Bewertung des Systems aus?
4. Wie wird ein solches System durch Probanden bezüglich seiner Gebrauchstauglichkeit und Sicherheit beurteilt?



Abb. 77: links: Umschaltung der Fahrstilwünsche und Unterstützungswünsche im Fahrzeug, rechts: S.A.N.T.O.S Demonstrator Fahrzeug

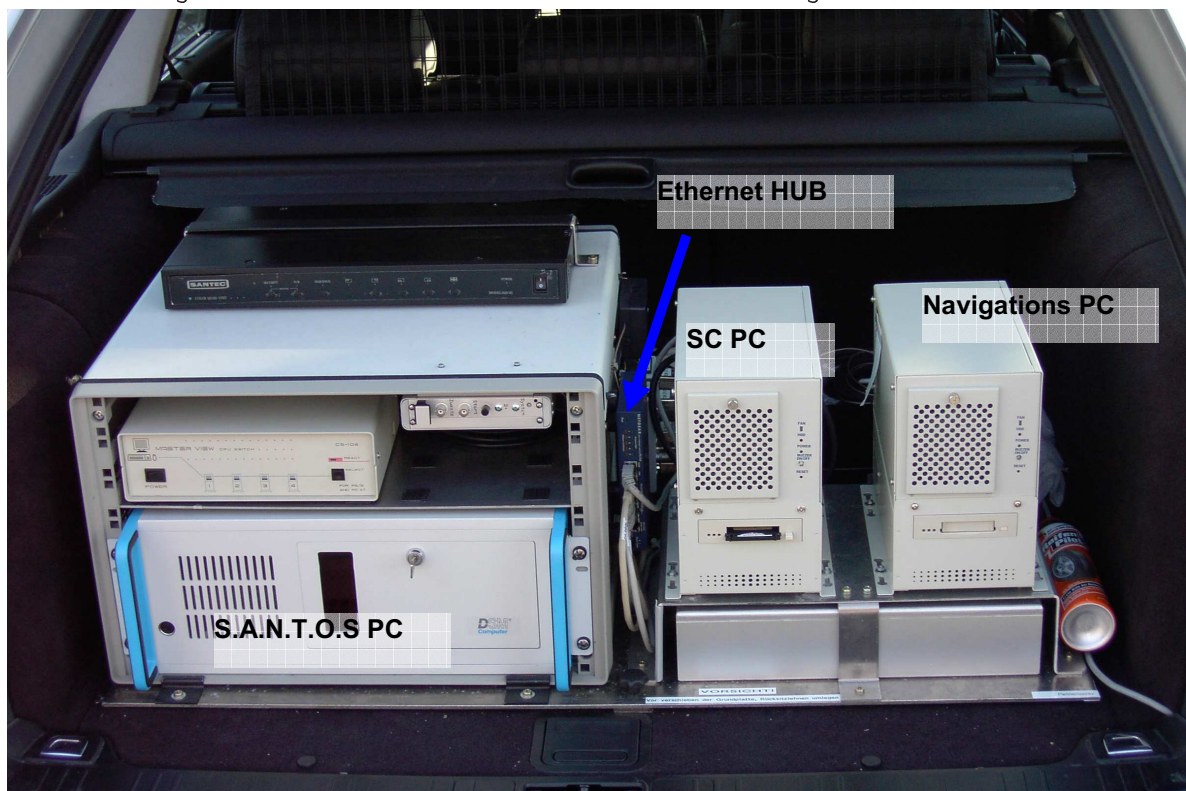


Abb. 78: PC im S.A.N.T.O.S Demonstrator

Ziel der Probandenfahrten war es, grundlegende Meinungen bzw. Trends und Tendenzen für eine Weiterentwicklung des Systems abgeleitet werden. Statistisch abgesicherte und belastbare Aussagen sind auf Grund der geringen Stichprobe und zu kurzen Fahrzeit (vgl. Weinberger 2001) nicht möglich.

7.3.2 Versuchsdesign

Neben der Wahl des Fahrstilwunsches (sportlich, normal, entspannt) konnten folgende MMI Lösungen dargestellt werden:

- **Regelungsmodus**

In diesem Modus regelt das Fahrzeug selbständig, abhängig vom Fahrstilwunsch, die Geschwindigkeit ein. Der Fahrer setzt mit Hilfe der Lenkradtasten eine Wunschgeschwindigkeit (grüne LED in Abb. 79) für den Tempomaten. Ist eine Geschwindigkeitsanpassung aufgrund der Streckengeometrie oder einer Geschwindigkeitsbegrenzung notwendig, regelt das System (unter Verwendung des Längsbeschleunigungsmodells) diese Geschwindigkeit rechtzeitig ein. Am Kurvenanfang bzw. zum Beginn des Tempolimits ist die neue Zielgeschwindigkeit dann erreicht (siehe Kap. 7.2.4). Die Geschwindigkeitsanpassung wird dem Fahrer durch einen gelben LED Kranz (Abb. 79) ca. 1 s vor Beginn der Regelung im Kombiinstrument angezeigt.

- **Empfehlungsmodus**

In diesem Modus wird dem Fahrer eine sicher und komfortabel fahrbare Geschwindigkeit, abhängig vom Fahrstilwunsch, empfohlen. Die empfohlene Geschwindigkeit wird durch eine einzelne gelbe LED im Kombiinstrument angezeigt. Muss die Geschwindigkeit verringert werden (Streckengeometrie oder Tempolimit), wird dies dem Fahrer durch die gelbe LED rechtzeitig angezeigt. Der Empfehlungszeitpunkt wird wieder mit Hilfe des Beschleunigungsmodells bestimmt. Überschreitet der Fahrer die empfohlene Geschwindigkeit bis 10 km/h , erfolgt eine optische Warnung durch Blinken der gelben LED. Bei einer höheren Überschreitung wird ein Warnton ausgegeben.

Die Versuchspersonen konnten neben dem Fahrstilwunsch noch die Höhe der Überschreitung von Tempolimits in Abhängigkeit vom Tempolimit einstellen. Das System wurde so ausgelegt, dass die Geschwindigkeit bei einem Ortseingang erst 50 m nach dem Schild erreicht wird. Ebenso wurde die Geschwindigkeitsbegrenzung innerorts schon 50 m vor dem Ortsausgangsschild wieder aufgehoben. Die Anpassungen („Verschiebung“ der Ortseingangsschilder, Überschreitung der Tempolimits) waren nötig, um sich möglichst gut an die üblichen Fahrgewohnheiten anzunähern. Es wurden 20 Personen als Probanden ausgewählt, die in der Regel dem höheren wissenschaftlichen Personal angehörten oder eine leitende Tätigkeit ausübten. Das Alter der Probanden streute zwischen 26 und 67 Jahren.

Zu Beginn der Fahrt erfolgte nach Schallenberg / Venetz (1999) mit Hilfe eines Fragebogens die Bestimmung von folgenden fünf Persönlichkeitsmerkmalen:



Abb. 79: Modifiziertes Kombiinstrument mit LED Kranz

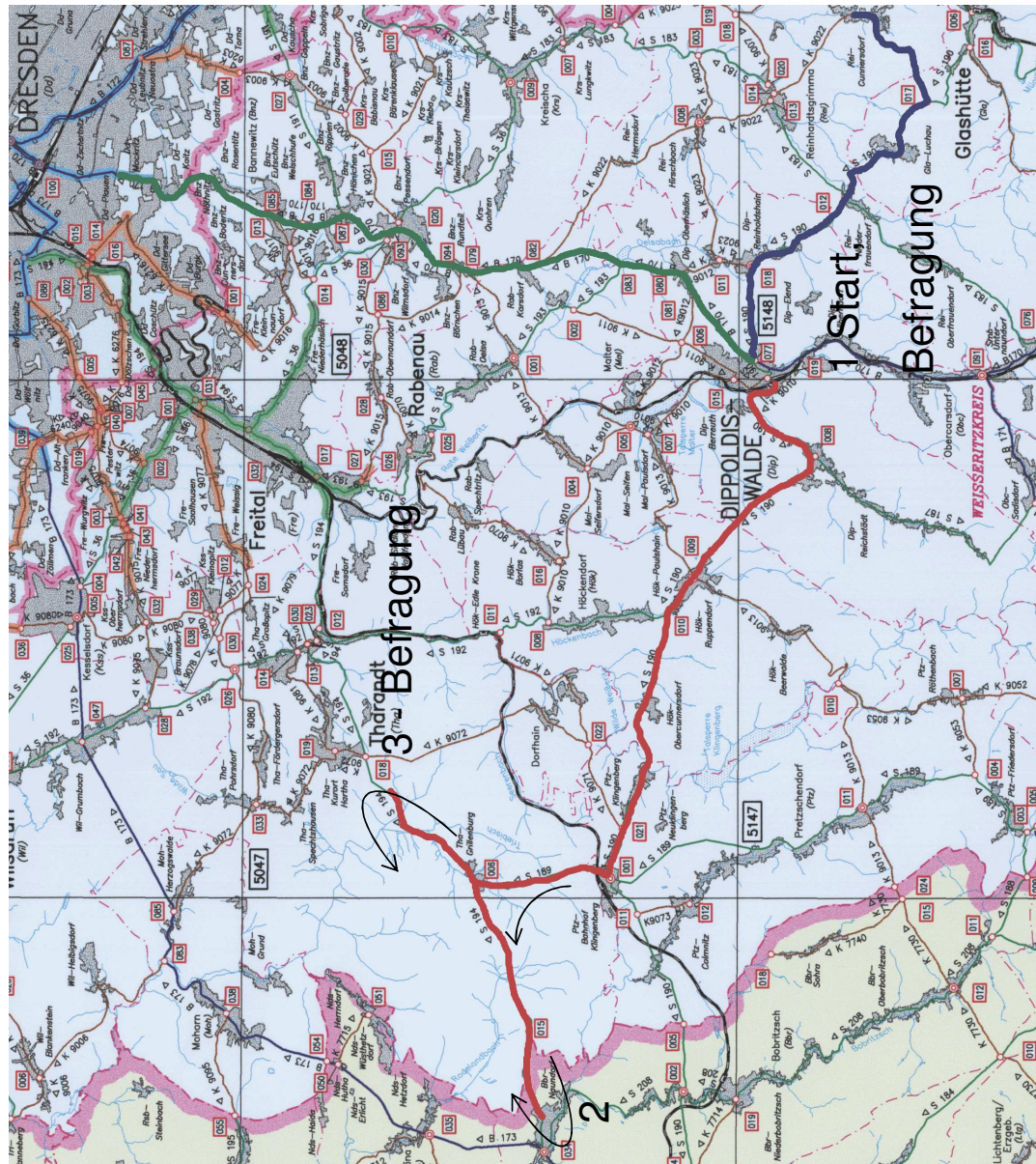
1. Extraversion,
2. Verträglichkeit,
3. Gewissenhaftigkeit,
4. emotionale Stabilität und
5. Kultur.

Den Erhebungsbogen füllten die Probanden selbst aus. Zu Beginn erfolgte eine ca. einstündige Eingewöhnungsfahrt. Hier konnten sich die Probanden mit der Funktionsweise des Tempomaten vertraut machen (grüne Strecke in Abb. 80). Im Anschluss daran konnte das SC - System getestet werden. Dazu standen ca. 30 km Teststrecke (blaue Strecke in Abb. 80) zur Verfügung. Die Probanden konnten verschiedene Fahrstilwünsche und Unterstützungswünsche wählen und diese beliebig oft wechseln. Nach Beendigung der Eingewöhnung wurde zum Startpunkt (Nummer 1 in Abb. 80) gefahren. Mit Hilfe eines Fragebogens wurde das momentane Befinden nach Richter u.a. (2002), die Bewältigung der Situation nach Richter u.a. (2002) und die momentan erlebte Anstrengung / psychische Anspannung nach Eilers u.a. (1986) erfasst. Der Proband wählte einen Fahrstilwunsch und konfigurierte die Übertretungen der Tempolimits etc. Es erfolgte eine Befahrung des ersten Teilstückes nach Naundorf (Punkt 2 in Abb. 80). Von Naundorf wurde nach Hartha gefahren (Punkt 3 in Abb. 80). Hier erfolgte wieder eine Befragung zum momentanen Befinden, zur Bewältigung der Situation, der subjektiv erlebten Anstrengung sowie technischen Fragen zum SC - System. Es wurde der Unterstützungswunsch gewechselt und zurück über Naundorf - S 189, S 190 zum Ausgangspunkt gefahren. Hier erfolgte die gleiche Befragung wie am Punkt 3. Der Unterstützungswunsch wurde in der

Richtung permutiert. Neben den Fragebögen wurden alle Fahrdynamikdaten während der Testfahrt kontinuierlich aufgezeichnet. Die Probandenfahrten wurden vom Institut für Arbeits-, Organisations- und Sozialpsychologie der Universität Dresden wissenschaftlich begleitet (Richter / Strich 2003). Der Fragebogen ist in Anlage 6 enthalten.

7.3.3 Ergebnisse

In Abb. 81 ist das Ergebnis für ausgewählte Fragestellungen zum SC - System im Regelungsmodus und in Abb. 82 für den Empfehlungsmodus dargestellt. Ersichtlich ist, dass Fahrer die den **sportlichen Fahrstilwunsch** wählten, die Geschwindigkeiten und Beschleunigungen akzeptierten. Die Mittelwerte liegen nahe am Idealwert und die Standardabweichung der Aussagen ist gering. Die Einschätzung ist unabhängig vom Unterstützungswunsch. Die Geschwindigkeit auf Geraden wurde tendenziell als etwas zu gering eingeschätzt. Das Geschwindigkeitsmodell für den sportlichen Fahrstilwunsch wurde somit bestätigt. Bei Probanden mit den **Fahrstilwunsch normal** wurde die Geschwindigkeit in Kurven und vor allem auf unübersichtlichen Strecken im Regelungsmodus tendenziell als etwas zu hoch eingeschätzt. Die Längsbeschleunigung liegt im Mittelwert sehr nahe am Optimum, die Werte streuen jedoch recht stark. Im Empfehlungsmodus empfanden die Probanden die gleichen Geschwindigkeiten jedoch als zu gering. Hier zeigt sich, dass die Unterstützungsform sich auf die zu empfehlenden Geschwindigkeiten auswirkt. Die Geschwindigkeiten für den Fahrstilwunsch normal müssen im Regelungsmodus im Bereich von Singularitäten und Abschnitten mit großer Kurvigkeit reduziert werden. Im Empfehlungsmodus muss die Geschwindigkeit auf Geraden erhöht werden. In beiden Fahrstilwünschen wurde der Empfehlungszeitpunkt und die vom Fahrzeug gewählten Beschleunigungen und Verzögerungen als nahe am Optimum eingeschätzt. Das Längsverzögerungsmodell wurde somit für beide Fahrstilwünsche und Unterstützungsformen bestätigt.



— Gewöhnung Fahrzeug

— Gewöhnung SC

— Testfahrt SC

Abb. 80: Strecke und Versuchsdurchführung Probandenfahrten

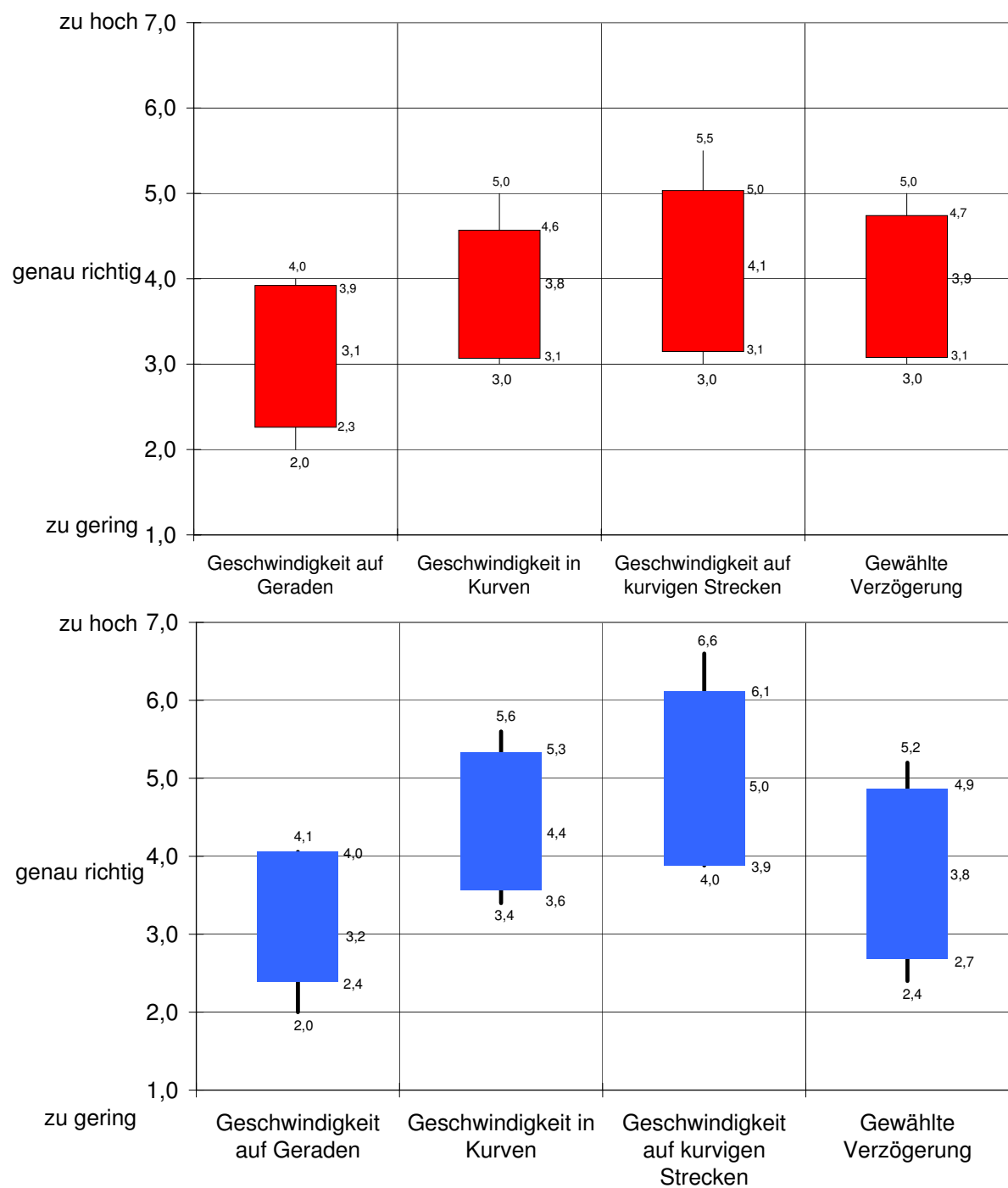


Abb. 81: Auswertung ausgewählter Fragen zum SC - System im Regelungsmodus, rot: Fahrstilwunsch sportlich, blau: Fahrstilwunsch normal (95 % Quantil, Standardabweichung, Mittelwert und 5% Quantil)

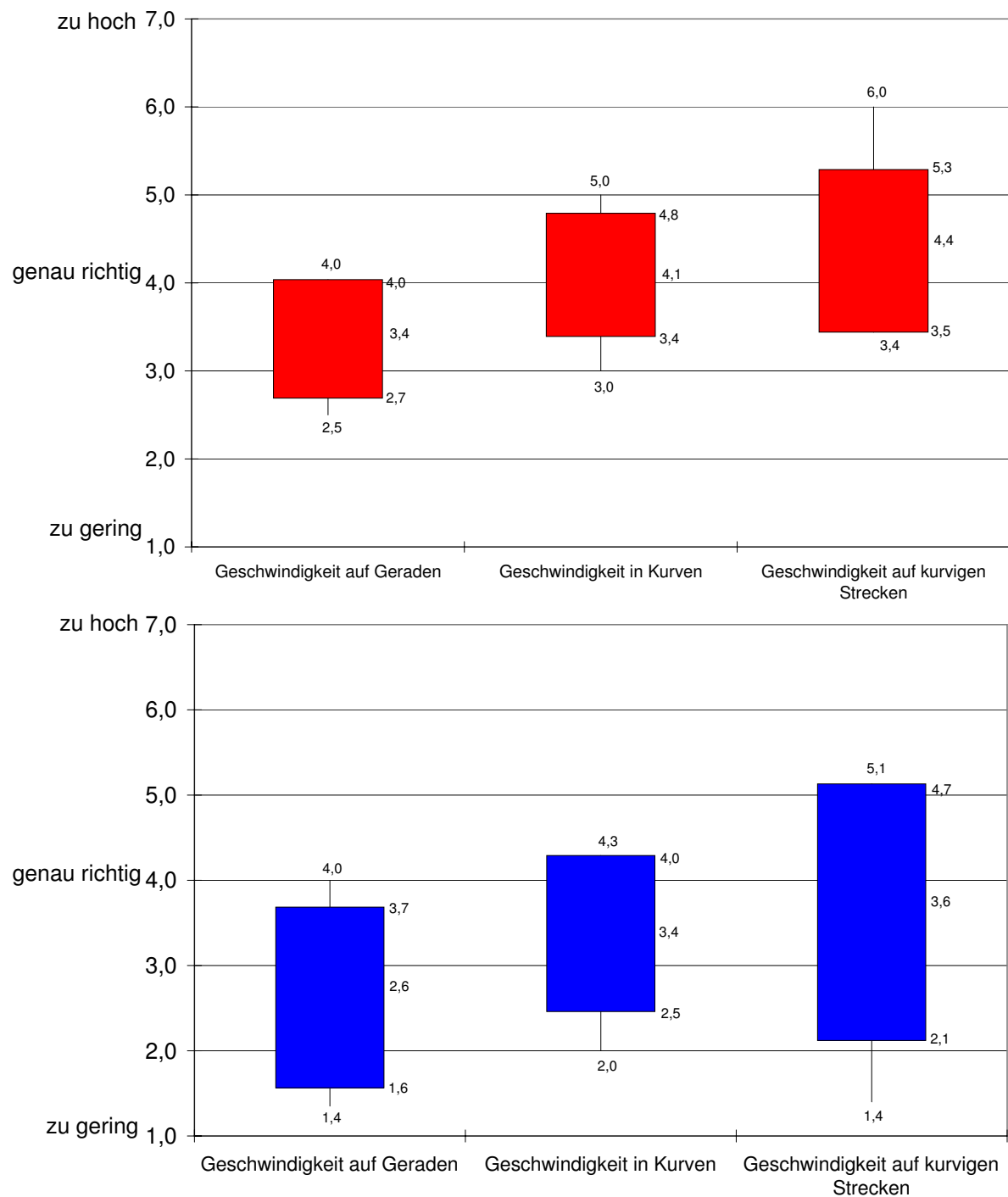


Abb. 82: Auswertung ausgewählter Fragen zum SC - System im Empfehlungsmodus, rot: Fahrstilwunsch sportlich, blau: Fahrstilwunsch normal (95 % Quantil, Standardabweichung, Mittelwert und 5% Quantil)

Bei einem paarweisen Vergleich von Gruppen, konnten folgende signifikante Zusammenhänge gefunden werden:

- **Einfluss des Alters**

Die Probanden konnten in zwei Altersgruppen eingeteilt werden. Dabei konnte festgestellt werden, dass:

- den älteren Personen die Längsverzögerungen im Regelungsmodus zu stark waren und
- im Empfehlungsmodus sowie auch im Regelungsmodus die Systemmeldungen über einen Ortseingang bzw. über eine Kurve zu spät kamen.

Weitere altersspezifische Aspekte konnten nicht festgestellt werden.

- **Vergleich Regelungsmodus versus Empfehlungsmodus**

Bei einem direkten Vergleich beider Modi konnten folgende signifikante Unterschiede festgestellt werden:

- Im Regelungsmodus wird eine größere Monotonie als im Empfehlungsmodus empfunden. Der Mentale Aufwand ist im Regelungsmodus am geringsten.
- Der Fahrspaß wurde im Regelungsmodus höher bewertet als im Empfehlungsmodus.
- Demgegenüber wird die Sicherheit (Konzentration auf das Fahren, Fahrsicherheit, Verkehrssicherheit etc.) im Empfehlungsmodus besser bewertet.

Es zeigt sich hier, dass erwartungsgemäß der Fahrer im Regelungsmodus am stärksten entlastet wird. Die Freude am Fahren wird im Regelungsmodus höher eingeschätzt als im Empfehlungsmodus. Bei dieser Bewertung ist jedoch zu vermuten, dass hier die Faszination der Technik über ein nahezu „automatisches Fahren“ einen Einfluss hatte. Die positive Beantwortung sicherheitsrelevanter Fragen im Empfehlungsmodus zeigt, dass dieses System durch Fahrer eine Akzeptanz finden könnte.

- **Einfluss der selbst eingeschätzten „Freude am Fahren“**

Die im Persönlichkeitsfragebogen angegebene „Freude am Autofahren“ korrelierte mit folgenden Aussagen:

- Fahrer, die angaben, viel Freude am Autofahren zu besitzen, schätzten den Regelungsmodus weniger monoton und sicherer ein, als Fahrer die weniger Freude am Autofahren haben.
- Im Empfehlungsmodus wurde von Probanden mit „Freude am Autofahren“ angegeben, dass das System verkehrs- und gebrauchstauglich ist. Das Systemvertrauen war bei diesen Probanden ebenfalls am höher, als bei denen mit weniger Freude am Fahren.

Es hat sich gezeigt, dass dieses System von Probanden mit „Freude am Autofahren“ positiv beurteilt wurde.

7.3.4 Zusammenfassung

Das SC - System konnte technisch erfolgreich umgesetzt und getestet werden. Von den Probanden wurde das SC - System positiv bewertet. Die Geschwindigkeiten und Beschleunigungen (Warnzeitpunkte) wurden akzeptiert. Für den Fahrstilwunsch „normal“ sollten im Regelungsmodus die Geschwindigkeiten in Kurven und Kurvigkeitsabschnitten leicht reduziert und auf Geraden leicht erhöht werden.

Einen Einfluss auf die Bewertung haben die Persönlichkeitsmerkmale, der gewählte Fahrstilwunsch und der Unterstützungswunsch. Probanden mit „Freude am Autofahren“ erleben im Regelungsmodus weniger Monotonie und mehr Fahrsicherheit. Im Empfehlungsmodus gaben diese mehr Fahrsicherheit, höhere Gebrauchstauglichkeit und ein höheres Systemvertrauen an als Probanden mit weniger Freude am Autofahren. Die Akzeptanz des Systems hängt ebenfalls von den Persönlichkeitsmerkmalen ab.

Es zeigt sich in der Gesamtbewertung, dass im Regelungsmodus mehr Fahrfreude erlebt wird, im Empfehlungsmodus die Sicherheit aber besser bewertet wird.

Der Empfehlungsmodus, der dem Prinzip des „Aktiven Operators“ am nächsten kommt, scheint sich als die günstigere Variante zu erweisen.

In Abb. 83 ist als Beispiel der tatsächliche Geschwindigkeitsverlauf während einer Fahrt im Empfehlungsmodus dargestellt. Ersichtlich ist, dass sich die Empfehlung gut der gefahrenen Geschwindigkeit annähert.

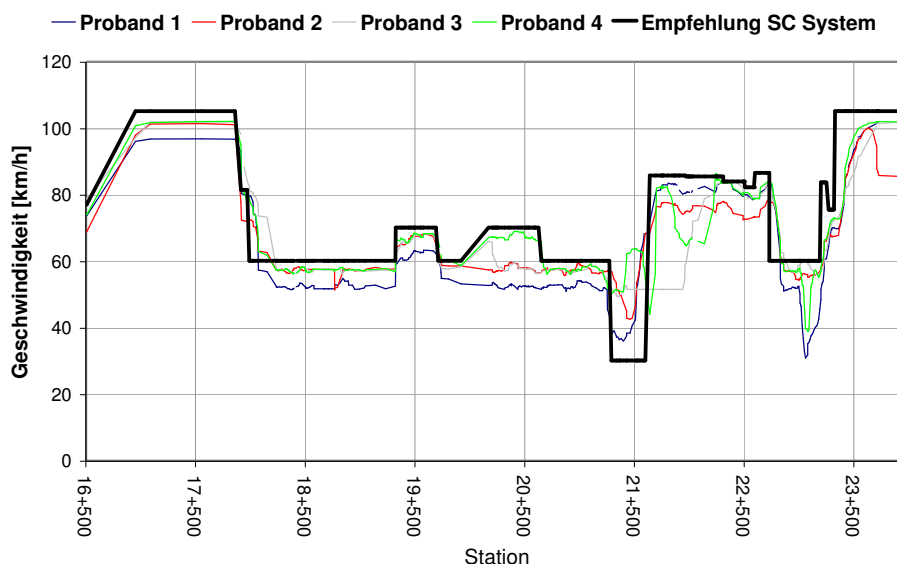


Abb. 83: Empfohlene und vom Fahrer gewählte Geschwindigkeit bei einer Probandenfahrt (Fahrstilwunsch sportlich)

8 Zusammenfassung und Ausblick

Die Erhöhung der Verkehrssicherheit ist seit vielen Jahre eine wichtige Aufgabe in vielen Bereichen der Wissenschaft.

Seit mehr als 30 Jahren wird der Prozess des Fahrens als kybernetischer Regelkreis beschrieben. Dieser setzt sich aus den Komponenten Fahrer, Fahrzeug und Straße zusammen. In den letzten Jahren wurden durch die verschiedenen Fachdisziplinen die einzelnen Komponenten erforscht. Auf Grundlage dieser Erkenntnisse wurden Verbesserungen erreicht, welche die Verkehrssicherheit erhöht haben. Der Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit bestand darin die Wechselwirkungen und Abhängigkeiten der drei Komponenten zu erforschen und durch die Entwicklung eines neuen Fahrerassistenzsystems einen weiteren Beitrag zur Verbesserung der Verkehrssicherheit zu leisten.

Sie hat sich mit der Weiterleitung von Informationen und Erkenntnissen aus dem Bereich der Forschung des Straßenentwurfs an den Fahrer beschäftigt. Die Schnittstellen bildeten hierbei in das Fahrzeug integrierte Fahrerassistenzsysteme. Diese Systeme lassen sich wie folgt klassifizieren:

- Systeme auf der Planungsebene (z.B. Navigationssystem),
- Systeme auf der Führungsebene (z.B. Tempomat),
- Systeme auf der Stabilisierungsebene (z.B. Anti- Blockier System, ABS).

Das hier entwickelte bzw. untersuchte Fahrerassistenzsystem, Speed Control (SC) arbeitet auf der Führungsebene und sollte folgende Zielstellungen erfüllen:

- Unterstützung des Fahrers bei der Wahl seiner Geschwindigkeit auf Außerortsstraßen.
- Anpassung des Assistenzsystems an die verschiedenen Erwartungen und Wünsche des Fahrers (Fahrstilwunsch, Unterstützungswunsch, Adaptation an verschiedene Umgebungsbedingungen).
- Unterstützung des Fahrers nach seinen Regeln und Erwartungen, ohne ihn zusätzlich zu belasten oder ihn in seiner Entscheidungsfreiheit einzuschränken.

Die Arbeit baut auf eine gemeinsame Untersuchung des Bundesministeriums für Forschung und Technik (BMFT), der Firmen BMW, Bosch und verschiedener Universitäten Deutschlands im Rahmen des Projektes **S**ituation-**A**ngepasste und **N**utzer-**T**yp-zentrierte **O**ptimierung von **S**ystemen zur Fahrerunterstützung (S.A.N.T.O.S ²) auf. Im Rahmen dieses Projektes wurden an der TU Dresden erste Grundlagen für die Entwicklung eines SC - Systems erarbeitet. Diese Ansätze wurden weiterentwickelt und ergänzt. Das Assistenzsystem soll folgende Aufgabe übernehmen:

²Das Projekt wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Forschung und Technologie unter dem Förderkennzeichen 19S9826A/B gefördert.

Ermittlung einer sicher und komfortabel fahrbaren Geschwindigkeit auf Grundlage der Streckengeometrie und Übermittlung dieser in geeigneter Form an den Kraftfahrer.

Aus dieser Aufgabenstellung ergaben sich folgende zu untersuchende Teilkomplexe:

1. Entwicklung geeigneter Geschwindigkeitsansätze zur Prognose der Geschwindigkeit für ein Fahrerassistenzsystem. Die Strecke ist dabei automatisiert in Abschnitte ähnlicher Charakteristik und Singularitäten einzuteilen.
2. Ableitung statistischer Ansätze für die Beschreibung des Längsverzögerungsverhaltens, um den den Fahrvorgang vollständig abbilden zu können.
3. Beachtung unterschiedlicher Fahrertypen (sportlich, normal, entspannt) bei der Geschwindigkeits- und Beschleunigungsprognose.
4. Abspeicherung der Streckengeometrie in einer feindigitalen Karte (Auswahl, Aufarbeitung und Aufnahme geeigneter Gebiete).
5. Integration des SC - Systems in einen Demonstrator (softwaretechnische Umsetzung).
6. Entwicklung und Umsetzung verschiedener Unterstützungsformen (Warnung, Empfehlung, Regelung) für eine optimale Verarbeitung und Akzeptanz des Fahrers.
7. Test und Bewertung des entwickelten und umgesetzten Systems durch Probanden.

Das Systems wurde technisch umgesetzt und ist funktionsfähig. In den Demonstratorfahrzeugen konnte die komplette Funktionalität dargestellt und getestet werden. Mit Hilfe der Probandenfahrten wurden zwei Systemauslegungen getestet. Zum Einen wurde eine Empfehlung für eine sicher und komfortabel fahrbare Geschwindigkeit in Abhängigkeit vom Fahrstilwunsch vorgegeben. Diese wurde dem Fahrer über eine spezielle LED im Kombiinstrument angezeigt. Überschritt der Fahrer diese deutlich, erfolgte eine akustische Warnung. Zum Anderen wurde die Geschwindigkeit eingeregelt. Dabei konnte der Fahrer jederzeit das System durch betätigen von Gas- oder Bremspedal übersteuern. Jeder Proband testete und bewertete beide Unterstützungsformen. Es zeigte sich, dass die Geschwindigkeits- und Beschleunigungsmodelle von den Probanden zum Großteil akzeptiert wurden. Beachtlich ist jedoch, dass die Unterstützungsform (Regelung versus Empfehlung) einen Einfluss besitzt. Geschwindigkeiten, die im Regelungsmodus als „genau richtig“ eingestuft wurden, bewerteten die gleichen Fahrer im Empfehlungsmodus als zu niedrig. Ebenso wurde festgestellt, dass Persönlichkeitsmerkmale einen Einfluss auf die Akzeptanz eines solchen Systems besitzen.

Es konnte nachgewiesen werden, dass die technischen Grundlagen für die Umsetzung eines SC - Systems vorhanden sind. Die Funktionsfähigkeit wurde unter Beweis gestellt. In den Probandenfahrten wurde eine Akzeptanz eines solchen System nachgewiesen. Bis zu einer Umsetzung in einem Serienfahrzeug müssen noch folgende Punkte geklärt werden:

- Während Probandenfahrten wurde der Empfehlungsmodus als günstigste Variante bewertet. Die Form der Rückmeldung (akustisch, haptisch oder optisch) muss jedoch in weiteren Forschungen verbessert werden.
- Das System unterstützt den Fahrer bei der Wahl seiner Geschwindigkeit. Wie bei jedem technischen System können Fehler auftreten, die zu einer falschen Prognose führen (z.B. fehlerhafte digitale Karte, schlechte Griffigkeit der Straße (Glatteis) etc.). Hier muss geklärt werden, wie Systemausfälle bzw. Systemfehler behandelt werden. Die juristischen Aspekte sind bei dieser Betrachtung von wesentlicher Bedeutung.
- Das System stellt hohe Anforderungen an die Genauigkeit und Aktualität der digitalen Karte. Es sind ggf. zusätzliche Sensoren (z.B. Kamera zur Erfassung von Baustellenbereichen) im Fahrzeug notwendig. Vor diesem Hintergrund ist eine wirtschaftliche Kosten - Nutzen Analyse erforderlich.

Es wurde ein Weg aufgezeigt, wie durch Verbindung verschiedener Fachdisziplinen ein weiterer Beitrag zur Erhöhung der Verkehrssicherheit geleistet werden kann.

Literatur

Al Kassar / Hoffmann, B. / Zmeck, G.

Der Einfluß der Streckenmerkmale auf die Momentangeschwindigkeit freifahrender Pkw
Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Bundesminister für Verkehr, Abteilung Straßenbau, 1981

Alexander, G. / Lunefeld, T.

A users guide to positive guidance in highway control, Kap. Information Design, S. 351–384

R. Easterby and H. Zwanga, 1984

Angenendt, W. / Erke, H. / Hoffmann, G. / Marburger, E. / Molt, W. / Zimmermann, G.

Situationsbezogene Sicherheitskriterien im Straßenverkehr

Bericht der Projektgruppe Situationsbezogene Sicherheitskriterien im Straßenverkehr, Bundesanstalt für Straßenwesen Bereich Unfallforschung, 1987

Appelt, V.

Sichtbare Radien als ein Kriterium zur Beurteilung der räumlichen Linienführung von einbahnigen Außerortsstraßen

Promotion, Technische Universität Dresden Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“ Dissertation A, 1998

Assmann, E.

Untersuchung über den Einfluss einer Bremsweganzeige auf das Fahrverhalten

Disstertation, Technische Universität München, 1985

Bachmann, T. / Schraut, M. / Naab, K.

BMW's Driver Assistance Concept for Integrated Longitudinal Support

In: 7th World Congress on Intelligent Transport Systems Turin Italy, 2000

Bakaba, E.

Zur Quantifizierung und Beurteilung geometrischer Inkonsistenzen auf Landstraßen

In: Festschrift anlässlich des 65. Geburtstages von Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Günter Weise, 2000

Belopitov, I. / Spacek, P.

Geschwindigkeiten in Kurven

Techn. Ber., Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Institut für Verkehrsplanung, Transporttechnik, Straßen- und Eisenbahnbau (IVT), 1999

Bernotat, R.

Anthropotechnik in der Fahrzeugführung

In: Ergonomics, Bd. 13, S. 353–377, 1970

- Bock, H.
Untersuchungen über Fahrgeschwindigkeiten außerhalb von Ortsdurchfahrten in Abhängigkeit von der Streckencharakteristik
Techn. Ber., Straßenbauamt Ulm, Referendararbeit, 1968
- Brieske, C.
Analyse und Auswertung des Fahrverhaltens von Kraftfahrern auf einbahnig zweistreifigen Außerortsstraßen in Abhängigkeit von Raumelementen und -folgen sowie räumlich quantifizierbarer Parameter
Studienarbeit, 2000
- Bubb, H. / Marstaller, R. / Sträter, O.
Abschlussbericht S.A.N.T.O.S des Lehrstuhles für Ergonomie (Ife)
Schlußbericht, Technische Universität München, 2002
- Bubb, H. / Reichart, G.
Ingenieurpsychologische Modellierung des Fahrens
Enzyklopädie der Psychologie, Verkehrspsychologie (in Vorbereitung), 2005
- Chaloupka, C. / Risser, R. / Antonides, A. / Lehner, U. / Praschl, M.
Auswirkungen neuer Technologien im Fahrzeug auf das Fahrverhalten
Nr. M 84 in Mensch und Sicherheit, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, 1998
- Dilling, J.
Fahrverhalten von Kraftfahrzeugen auf kurvigen Strecken
In: Straßenbau und Verkehrstechnik, , Heft 151, 1973
- Donges, E.
Ein regelungstechnisches Zwei-Ebenen-Modell des menschlichen Lenkverhaltens im Kraftfahrzeug
In: Zeitschrift für Verkehrssicherheit, , 24, S. 98–112, 1978
- Durth, W.
Ein Beitrag zur Erweiterung des Modells für Fahrer, Fahrzeug und Straße in der Straßenplanung
In: Straßenbau und Verkehrstechnik, , Heft 163, 1974
- Durth, W. / Bald, J.
Auswertung von Geschwindigkeitsprofilen auf Außerortsstraßen
Bericht zum Forschungsprojekt 8225/3 der Bundesanstalt für Straßenwesen, Technische Universität Darmstadt, 1986
- Duynstee, L. / Katteler, H. / Martens, G.
Intelligent Speed Adaptation: Selected Results of the dutch practical trial Paper Number 678

- In: Proceeding of the ITS Congress 2001 in Sydney, 2001
- Ebersbach, D. / Dietze, M. / Mayser, C. / Kohlhof, S. / Weise, G.
Fahrerassistenzsysteme zur Unterstützung der Geschwindigkeitswahl im Pkw
In: Straßenverkehrstechnik, Bd. 5, 5, S. 236–244, 2002
- Eilers, K. / Nachreiner, F. / Hänecke, K.
Entwicklung und Überprüfung einer Skala zur Erfassung erlebter Anstrengung
In: Zeitschrift für Arbeitswissenschaft, Bd. 40, S. 215–224, 1986
- ELSNER
Der Elsner. Handbuch für Straßen- und Verkehrswesen
Otto Elsner Verlagsgesellschaft, 2003
- Engelke, H.
Ableitung streckenspezifischer Parameter zur Bewertung der räumlichen Linienführung von Straßen
Promotion, Technische Universität Dresden Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“ Dissertation A, 1990
- Fiedler, J.
Bewertung von Landstraßen mit Hilfe von Geschwindigkeitsbildern
Forschungsarbeiten aus dem Straßenwesen Heft 69, Bundesminister für Verkehr, Abteilung Straßenbau
Bonn - Bad Godesberg 1967
- Fuchs, J.
Beitrag vom Verhalten von Fahrer und Fahrzeug bei Kurvenfahrt
VDI Verlag, 1993
- Glaser, S. / Aguilera, V.
Vehicle - Infrastructure-Driver Speed Profile: Towards the Next Generation of Curve Warning Systems Paper Number 4107
In: Proceeding of the ITS Congress 2003 in Madrid, 2003
- Hamberger, W.
Verfahren zur Ermittlung und Anwendung von prädiktiven Streckendaten für Assistenzsysteme in der Fahrzeugführung
VDI Verlag, 1999
- Hiersche, E. / Lamm, R. / Dieterle, K. / Nikopour, A.
Auswirkungen von Ausbaumaßnahmen gemäß RAL -L auf die Verkehrssicherheit zweispuriger Straßen
Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik Heft 431, Bundesminister für Verkehr, Abteilung Straßenbau
Bonn - Bad Godesberg 1984

Hiersche, H.

Die Bedeutung und Ermittlung von Sichtweiten von Straßen

In: Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, , Heft 67, 1968

Hiersche, H. / Knepper, S. / Messmer, H. / Nikpour, A. / Euler, G. / Lang, J. / Jakobi, D. / Retzlaff, G. / Plahak, R.

Bewertung des Fahrverhaltens auf nassen Fahrbahnen und Einsatz der konduktometrischen Meßsonde

Forschung Straßenbau und Verkehrstechnik Heft 575, Bundesministerium für Verkehr, Abteilung Straßenbau, 1989

Hogema, J. / Arem, B. / Smulders, S. / Coemet, M.

Modelling Changes in Driving Behaviour: On the Effects of Autonomous Intelligent Cruise Control

In: Traffic and Transport Psychology, Theory and Application, T. Rothengatter and E. Vaya, 1997

König, W. / Weiß, K. / Gehrke, H. / Haller, R.

Situations-angepasste und Nutzer-Typ-zentrierte Optimierung von Systemen zur Fahrerunterstützung

In: Vortrag zur GfA Herbsttagung 2000 in Garching, , 1, 2000

König, W. / Weiß, K. / Mayser, C.

Gemeinsamer Projektabschlussbericht der Robert Bosch GmbH und der BMW Group zum Projekt Situations - Angepasste und Nutzer - Typ - zentrierte Optimierung von Systemen der Fahrerunterstützung (S.A.N.T.O.S)

Forschungsbericht, Robert Bosch GmbH und BMW Group, 2002

Kohlhof, S.

Längsregelung von Pkw basierend auf digitalen Karten

Diplomarbeit, Technische Universität München, Institut für Produktionstechnik, 2001

Kopf, M. / Hermann, K.

Visual Demands of an Aided vs. Unaided Navigation Task in Real Traffic

In: Seventh International Conference on Vision in Vehicles, , 1, 1997

Köppel, G. / Bock, H.

Kurvigkeit, Stetigkeit und Fahrgeschwindigkeit

In: Straße und Autobahn, , Heft 8, 1970

Köppel, G. / Bock, H.

Fahrgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Kurvigkeit

Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik Heft 269, Bundesminister für Verkehr, Abteilung Straßenbau

Bonn - Bad Godesberg 1979

Krebs, H.

Einfluß des Kurvenschneidens auf Bogengeschwindigkeit und Trassierungsgrundsätze
In: Straße und Autobahn, , Heft 8, 1973

Krebs, H. / Damianoff, N.

Geschwindigkeitsverhalten bei Gefahrenzeichen, in Kurven und an Stellen mit Geschwindigkeitsbeschränkung
In: Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, , Heft 380, 1983

Krebs, H. / Klöckner, J.

Untersuchungen über Unfallraten in Abhängigkeit von Straßen- und Verkehrsbedingungen außerhalb geschlossener Ortschaften
Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik Heft 223, Bundesminister für Verkehr, Abteilung Straßenbau
Bonn - Bad Godesberg 1977

Kupke, P.

Simulatorexperimente zum trassenabhängigen Fahrverhalten und Überprüfen der Linieneinführung
A, Universität Karlsruhe, 1977

Lahrman, H. / Madsen, J. / Borch, T.

Intelligent Speed Adaptation: Development of a GPS Based ISA - System and field Trial of the System with 24 Test Drivers Paper Number 472
In: Proceeding of the ITS Congress 2001 in Sydney, 2001

Lamm, R.

Fahrdynamik und Streckencharakteristik - Ein Beitrag zum Entwurf von Straßen unter besonderer Berücksichtigung der Geschwindigkeit
Techn. Ber., Universität Karlsruhe, Veröffentlichungen des Institutes für Eisenbahnwesen, 1973

Lamm, R. / Günther, A. / Steffen, H.

Sicherheitsüberprüfung im Straßenentwurf unter Anwendung komplexer EDV - Systeme
In: Straßen- und Tiefbau, Bd. 10, 1982

Landau, H. / Weiße, J.

Abschlussbericht S.A.N.T.O.S des Instituts für Arbeitswissenschaft (IAD)
Schlußbericht, Technische Universität Darmstadt, 2002

Leutzbach, W. / Zoellmer, J.

Zusammenhang zwischen der Verkehrssicherheit und den Elementen des Straßenentwurfs
Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik Heft 545, Bundesminister für Verkehr, Abteilung Straßenbau
Bonn - Bad Godesberg 1984

- Lipphard, D.
Geschwindigkeiten in den neuen Bundesländern
In: Zeitschrift für Verkehrssicherheit, Bd. 40, S. 151–154, 1994
- Lippmann, R.
Analyse der Längs- und Querdynamik von unbehindert fahrenden Pkw auf Außerortsstraßen
Studienarbeit, 2002
- Lippold, C.
Weiterentwicklung ausgewählter Entwurfsgrundlagen von Landstraßen
Promotion, Darmstadt, Technische Hochschule Darmstadt, Fachbereich Bauingenieurwesen, Dissertation A, 1997
- Lippold, C. / Ebersbach, D. / Dietze, M.
Forschungsprojekt GPS-gestützte Erfassung von Straßendaten
Schlußbericht, Technische Universität Dresden, Institut für Verkehrsanlagen
Dresden 2003
- Lippold, C. / Ebersbach, D. / Schulz, R.
Automatisierte Nachtrassierung auf der Grundlage von Punktfolgen
Programmsystem TrassOMat, Technische Universität Dresden, Institut für Verkehrsanlagen
Dresden 2002
- Manns, K.
Querbeschleunigung und Querruck in der Übergangsbogenbemessung
Promotion, TU Darmstadt Fachbereich Wasser und Verkehr, 1985
- Marstaller, R. / Mayser, C. / Kohlhof, S. / Bubb, H.
Akzeptanzuntersuchungen zu einer automatischen Längsregelung im Kfz
In: 4. Berliner Werkstatt Mensch - Maschine - Systeme vom 10.10.2001 bis 12.10.2001, 2001
- Meewes, V. / Gerz, U. / Leins, W.
Zur Beschreibung des Verkehrsablaufes auf Straßen mit und ohne Richtungstrennung
Techn. Ber.
- Myhrberg, S.
Technology Options for Intelligent Speed Adaptation Paper Number 2646
In: Proceeding of the ITS Congress 2003 in Madrid, 2003
- Niggstich, R.
Fahrerassistenzsysteme mit komplexen elektronischen Komponenten im Umfeld von Verkehrssicherheit und Zulassung
In: Zeitschrift für Verkehrssicherheit, , 48, S. 117–120, 2002

Patzak, J.

Analyse des Fahrverhaltens von Pkw auf Außerortsstraßen

Diplomarbeit, Technische Universität Dresden Fakultät Bauingenieurwesen Institut für Verkehrswegebau Lehrstuhl Planung und Entwurf von Straßenverkehrsanlagen und Anlagen des Luftverkehrs, 2002

Prestl, P. / Sauer, T. / Steinle, J. / Tschernoster, O.

The BMW Active Cruise Control ACC

In: Proceedings of SAE 2000, Society of Automotive Engineers, Detroit 2000

RAS-L

Richtlinie für die Anlage von Straßen Teil Linienführung

1995

Reichart, G. / Haller, R.

Mehr aktive Sicherheit durch neue Systeme für Fahrzeug und Straßenverkehr, Kap. Autofahrer und Verkehrssicherheit, S. 199–215

Fastenmeier, 1995

Richter, P. / Debitz, U. / Schulz, F.

Diagnostik von Arbeitsanforderungen und kumulativen Beanspruchungsfolgen am Beispiel eines Call Centers

In: Zeitschrift für Arbeitswissenschaft, Bd. 10, 8, 2002

Richter, P. / Strich, T.

Speed Control - Akzeptanzuntersuchung

Abschlussbericht, Institut für Arbeits-, Organisations- und Sozialpsychologie der Technischen Universität Dresden, 2003

Schallenberger, U. / Venetz, M.

Kurzversionen des MRS-Inventars von Ostendorf zur Erfassung der fünf großen Persönlichkeitsfaktoren

Berichte aus der Abteilung Angewandte Psychologie, Psychologisches Institut der Universität Zürich, Abteilung Angewandte Psychologie, 1999

Schlichter, H.-G.

Streckencharakteristik: Eine analytische Betrachtung

In: Straße und Autobahn, , Heft 2, 1976

Schraut, M.

Umgebungserfassung auf Basis lernender digitaler Karten zur vorausschauenden Konditionierung von Fahrerassistenzsystemen

Promotion, München, Technische Universität, Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik, 2000

Schulz, R.

Möglichkeiten und Grenzen einer automatisierten Nachtrassierung
Studienarbeit, Technische Universität Dresden Lehrstuhl Gestaltung von Straßenverkehrsanlagen, 2002

Siobbel, T.

The Road to Safety Maps Paper Number 2394
In: Proceeding of the ITS Congress 2003 in Madrid, 2003

Sosouhmien, A.

Entwicklung eines Rahmenkonzeptes zur Bewertung der Linienführung von Außerortsstraßen nach der Zielfunktion Fahrsicherheit
Promotion, Dresden, Technische Universität, Fakultät Verkehrswissenschaften, 2001

Steierwald, G. / Buck, M.

Geschwindigkeitsverhalten auf einbahnigen Außerortsstraßen in Abhängigkeit von baulichen, betrieblichen und verkehrlichen Randbedingungen
Straßenbau und Straßenverkehrstechnik Heft 621, Bundesminister für Verkehr, Abteilung Straßenbau, 1992

Steyer, R. / Sossoumihen, A.

Modellansatz zur Abschätzung der Geschwindigkeit V_{85} in Abhängigkeit der Lage- und Höhenplangeometrie in Kurvenbereichen, 1997
Unveröffentlichtes Manuskript Dresden

Thoma, J.

Geschwindigkeitsverhalten und Risiken bei verschiedenen Straßenzuständen, Wochentagen und Jahreszeiten
In: Zeitschrift für Verkehrssicherheit, Bd. 40, S. 7–11, 1994

Trapp, K.

Untersuchungen über den Verkehrsablauf auf Landstraßen
Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik Heft 113, Bundesminister für Verkehr, Abteilung Straßenbau
Bonn - Bad Godesberg 1971

Trapp, K. / Oellers, F.

Streckencharakteristik und Fahrverhalten auf zweispurigen Landstraßen
Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik Heft 176, Bundesminister für Verkehr, Abteilung Straßenbau
Bonn - Bad Godesberg 1974

Weinberger, M.

Der Einfluss von Adaptive Cruise Control Systemen auf das Fahrverhalten
Berichte aus der Ergonomie, Shaker Verlag Aachen, 2001

Weise, G. / Dietze, M. / Ebersbach, D.

Programmdokumentation zum Programmsystem Perspekto, 2001a

Weise, G. / Ebersbach, D. / Dietze, M.

Situations-angepasste und Nutzer-Typ-zentrierte Optimierung von Systemen zur Fahrerunterstützung

3. Meilensteinbericht zum Arbeitspaket 5.1 - Erprobung Einzelsysteme, Forschungsprojekt im Auftrag der BMW Group und Robert Bosch GmbH, 2001b

Weise, G. / Lippold, C. / Ebersbach, D. / Dietze, M.

Kinematische Erfassung von Straßendaten

Schlußbericht, Forschungsprojekt Im Auftrag des Straßenbauamtes Dresden, 2003

Winner, H. / Fecher, N.

Abschlussbericht S.A.N.T.O.S des Instituts für Kraftfahrzeugtechnik (fzd)

Schlußbericht, Technische Universität Darmstadt, 2002

Zuberbühler

Beschleunigungen

In: Straße und Tiefbau, Bd. 10, 1964

Abbildungsverzeichnis

1	Verteilung der Straßenlängen und Jahresfahrleistung auf die Straßenkategorien Quelle: ELSNER 2003	1
2	Verteilung der Getöteten auf die Straßenklassen Quelle: ELSNER 2003	2
3	Entwicklung der Verkehrssicherheit in Deutschland Ausgangswerte: 100% 1955: 12.800 Getötete; 386.000 Unfälle; 98,7 Mrd. km Fahrleistung	3
4	Regelkreis Fahrer - Fahrzeug - Straße Dilling (1973)	4
5	Drei - Ebenen - Modell der Fahrzeugführung nach Donges (1978)	5
6	Teilmodell des Regelkreises nach Bubb / Reichart (2005)	5
7	Einteilung der Fahraufgaben in drei Ebenen mit korrespondierenden zeitlichen Randbedingungen und kognitiven Anforderungen nach Reichart / Haller (1995)	8
8	Grundkonzept der Fahrerassistenz nach Reichart / Haller (1995)	11
9	Zusammenhang Fahrertyp nach Assmann (1985) und fahrdynamische Größen Marstaller u.a. (2001)	14
10	Funktionsprinzip ACC System aus Chaloupka u.a. (1998)	15
11	Funktionsprinzip des ISA Systems Myhrberg (2003)	16
12	On Board Unit des Dänischen ISA Systems Lahrman u.a. (2001)	17
13	Aufbau digitaler Karten Schraut (2000)	19
14	Beschreibung eines Streckenzuges durch Segmente und shapes	19
15	Ankopplung einer zusätzlichen Datenbank an die Karte von NavTech (Schraut 2000)	20
16	Vom Fahrer akzeptierte Querschleunigung in Abhängigkeit des Fahrer- typs und dem Radius aus Hamberger (1999)	22
17	Abschnittseinteilung für eine Außerortsstraße	25
18	Vergleich der vom SC geregelten Geschwindigkeit und der gemessenen Geschwindigkeit V_{85}	26
19	Strecken mit unterschiedlicher Streckencharakteristik und gleicher Kur- vigkeit	29
20	Zusammenhang Radius - Geschwindigkeit (Lippold 1997)	30
21	Zusammenhang zwischen Radius, Richtungsänderungswinkel und gefah- renem Radius nach Sosouhmihen (2001)	32
22	Zusammenhang zwischen Annäherungsgeschwindigkeit und K_G (links) so- wie zwischen Geschwindigkeitsdifferenz und ΔKU Sosouhmihen (2001)	33
23	Einfluss der Feuchtigkeitsklasse auf das Fahrverhalten Hiersche u.a. (1989) 34	
24	Bereich betriebsbedingter Längsverzögerungen auf Grund der Strecken- charakteristik	36
25	Umrechnung des Bremsweges nach Krebs / Damianoff (1983) in mittlere Längsverzögerungen	38

26	Quereschleunigung eines Fahrers auf 2 verschiedenen Strecken aus Fuchs (1993)	39
27	Untersuchungsablauf zur Weiterentwicklung des SC - Systems	44
28	Geschwindigkeits- und Beschleunigungsprofil für zwei verschiedene Fahrer	50
29	Verteilung der berechneten maximalen Quereschleunigung für alle Einzelprofile für zwei Streckenabschnitte	51
30	Verteilungsfunktionen für die maximale Quereschleunigung für zwei ausgewählte Strecken	52
31	Gemessene Geschwindigkeitsprofile	54
32	Durch die Streckencharakteristik beeinflusste maßgebende Geschwindigkeiten	54
33	Definition charakteristischer Geschwindigkeiten	56
34	Verteilung der aus den Einzelprofilen ermittelten Fahrertypen in Abhängigkeit von verschiedenen Kennwerten	58
35	Zusammenhang Radius - Geschwindigkeit für das Kriterium maximale Quereschleunigung	60
36	Zusammenhang Radius - Geschwindigkeit für das Kriterium maximale Längschleunigung	60
37	Zusammenhang Radius - Geschwindigkeit für das Kriterium maximale Längsverzögerung	60
38	Verteilung der charakteristischen Geschwindigkeiten für Singularitäten (links) und Abschnitte ähnlicher Streckencharakteristik (rechts)	61
39	Zusammenhang Kurvigkeit - Geschwindigkeit für den Fahrertyp entspannt 63	
40	Zusammenhang Kurvigkeit - Geschwindigkeit für den Fahrertyp normal .	63
41	Zusammenhang Kurvigkeit - Geschwindigkeit für den Fahrertyp sportlich	63
42	Zusammenhang Fahrbahnbreite, Kurvigkeit und Geschwindigkeit	64
43	Zusammenhang Radius - Geschwindigkeit für den Fahrertyp sportlich (alle Singularitäten)	67
44	Zusammenhang Radius - Geschwindigkeit für den Fahrertyp normal (alle Singularitäten)	67
45	Zusammenhang Radius - Geschwindigkeit für den Fahrertyp entspannt (alle Singularitäten)	67
46	Zusammenhang Radius - Geschwindigkeit und Richtungsänderungswinkel für Linkskurven	69
47	Zusammenhang Radius - Geschwindigkeit und Kurvigkeit des Annäherungsbereiches für Linkskurven	70
48	Zusammenhang Radius - Geschwindigkeit und gewichtete Kurvigkeit des Annäherungsbereiches für Linkskurven	72
49	Zusammenhang Radius - Geschwindigkeit und Fahrbahnbreite für Linkskurven	73

50	Verteilung der Geschwindigkeiten (Summenhäufigkeit) für unterschiedliche Umgebungsbedingungen an einem Messquerschnitt	75
51	Geschwindigkeitsprognosemodell	79
52	Geschwindigkeitsprognosemodell für Abschnitte ähnlicher Streckencharakteristik für Fahrbahnbreiten kleiner 6,0 m	80
53	Geschwindigkeitsprognosemodell für Abschnitte ähnlicher Streckencharakteristik für Fahrbahnbreiten größer 6,0 m	80
54	Zusammenhang Querbesehleunigung-Radius für den Fahrertyp entspannt 83	
55	Zusammenhang Querbesehleunigung-Radius für den Fahrertyp normal .	83
56	Zusammenhang Querbesehleunigung-Radius für den Fahrertyp sportlich	83
57	Ausgewertete Kennstellen der Längsverzögerung	84
58	Zusammenhang mittlere Längsverzögerung - Geschwindigkeitsdifferenz für den Fahrertyp entspannt	85
59	Zusammenhang mittlere Längsverzögerung - Geschwindigkeitsdifferenz für den Fahrertyp normal	85
60	Zusammenhang mittlere Längsverzögerung - Geschwindigkeitsdifferenz für den Fahrertyp sportlich	85
61	Zusammenhang maximale Längsverzögerung - Geschwindigkeitsdifferenz für den Fahrertyp entspannt	86
62	Zusammenhang maximale Längsverzögerung - Geschwindigkeitsdifferenz für den Fahrertyp normal	86
63	Zusammenhang maximale Längsverzögerung - Geschwindigkeitsdifferenz für den Fahrertyp sportlich	86
64	Auswirkungen unterschiedlicher Annäherungsgeschwindigkeiten auf die mittlere Längsverzögerung	89
65	Auswirkungen unterschiedlicher Richtungsänderungswinkel auf die mittlere Längsverzögerung	91
66	Auswirkungen des Vorhandenseins eines Übergangsbogens auf die mittlere Längsverzögerung	91
67	Beschreibung des Geschwindigkeits- und Besehleunigungsverhaltens . . .	95
68	Regelkreis des SC - Systems im S.A.N.T.O.S Demonstrator	97
69	Strecken für die feindigitale Karte im Raum Sachsen	99
70	Ausgangsdaten zur Erzeugung der digitalen Karte	100
71	fertige feindigitale Karte (Ausschnitt)	100
72	Funktionsprinzip und Beziehungen der SC - Software in den S.A.N.T.O.S Demonstratoren	101
73	Beschreibung eines Punktes durch geographische Koordinaten (Latitude und Longitude)	102
74	Anwendung vereinfachte Transformation Schraut (2000)	103
75	Geometrie im Kreis Schulz (2002)	103
76	Modell zur Beschreibung der Längsverzögerung (Regelungsmodus) . . .	107

77	links: Umschaltung der Fahrstilwünsche und Unterstützungswünsche im Fahrzeug, rechts: S.A.N.T.O.S Demonstrator Fahrzeug	108
78	PC im S.A.N.T.O.S Demonstrator	108
79	Modifiziertes Kombiinstrument mit LED Kranz	110
80	Strecke und Versuchsdurchführung Probandenfahrten	112
81	Auswertung ausgewählter Fragen zum SC - System im Regelungsmodus, rot: Fahrstilwunsch sportlich, blau: Fahrstilwunsch normal (95 % Quantil, Standardabweichung, Mittelwert und 5% Quantil)	113
82	Auswertung ausgewählter Fragen zum SC - System im Empfehlungsmodus, rot: Fahrstilwunsch sportlich, blau: Fahrstilwunsch normal (95 % Quantil, Standardabweichung, Mittelwert und 5% Quantil)	114
83	Empfohlene und vom Fahrer gewählte Geschwindigkeit bei einer Probandenfahrt (Fahrstilwunsch sportlich)	116

Tabellenverzeichnis

1	Ausgewählte Fahrerassistenzsysteme und Zuordnung zu den Ebenen der Fahraufgabe	10
2	Aufbau der Tabelle zur Beschreibung der Geometrie	21
3	Geschwindigkeiten auf Außerortsstraßen bei unterschiedlicher Witterung Thoma (1994)	35
4	Verwendete Messstrecken	45
5	Kennwerte für die Fahrertypisierung von zwei Geschwindigkeitsprofilen	50
6	Ermittelte Regressionsfunktionen für den Zusammenhang Radius und Geschwindigkeit für jeden Fahrertyp in Abhängigkeit verschiedener Kennwerte zur Fahrertypisierung	59
7	Zusammenhang Kurvigkeit-Geschwindigkeit	62
8	Mittlere gemessene Geschwindigkeitsdifferenzen zur Tag-trocken Messung in km/h	65
9	Funktionen für den Zusammenhang Radius - Geschwindigkeit	66
10	Ermittelte Regressionsparameter zur Ermittlung des Einflusses des Richtungsänderungswinkels in Abhängigkeit vom Fahrertyp	69
11	Regressionsparameter zur Ermittlung des Einflusses der gewichteten Kurvigkeit in Abhängigkeit vom Fahrertyp	71
12	Regressionsparameter zur Ermittlung des Einflusses der Kurvigkeit in Abhängigkeit vom Fahrertyp	72
13	Regressionsparameter zur Ermittlung des Einflusses der Fahrbahnbreite in Abhängigkeit vom Fahrertyp	74
14	Mittlere gemessene Geschwindigkeitsdifferenzen im Bezug zur Tag-trocken Messung in km/h	75
15	Einflüsse unterschiedlicher Parameter auf die Geschwindigkeit in Abhängigkeit vom Fahrertyp	77
16	Regressionsfunktion zur Beschreibung des Zusammenhanges Querbeschleunigung - Radius	82
17	Funktionen für den maximale Längsverzögerung und mittlere Längsverzögerung in Abhängigkeit von der Geschwindigkeitsdifferenz	88
18	Einflüsse unterschiedlicher Parameter auf die Geschwindigkeit in Abhängigkeit vom Fahrertyp	93
19	Von EDDAS gesendete Daten zur Berechnung der Geschwindigkeiten	102
20	Vergleich der Quantilsgeschwindigkeiten aus Verfolgungsfahrten und Querschnittsmessungen Brieske (2000)	149
21	Prüfung auf Zugehörigkeit zur „gleichen Grundgesamtheit“ Brieske (2000)	149
22	Prüfung auf Normalverteilung mit Hilfe des Kolmogoroff - Smirnow - Einstichproben - Anpassungstests Brieske (2000)	150

9 Anlagen

1. Ergebnisse der Untersuchungen zum Geschwindigkeitsmodell (Auszug)
2. Ergebnisse des Tests auf gleiche Grundgesamtheit zwischen den Querschnittsmessungen und Verfolgungsfahrten
3. Definition der Elemente
4. Bildung der Abschnitte
5. Modell zur Ermittlung des Zeitpunktes zum Setzen der neuen Wunschgeschwindigkeit
6. Fragebögen

1. Ergebnisse der Untersuchungen zum Geschwindigkeitsmodell (Auszug)

Fahrttypen ohne Falluntersuchung

entspannt links

	untere Konfgr.	obere Konfgr.
Modellgleichung	Vmin= 14,76691*log(abs. Radius)-6,00194	x
Anz. Gültiger Fälle	1065	
Varianz	0,54	
Bestimmtheitsmaß	0,73	
a	14,76691	15,59005
c	6,00194	9,94606

normal links

	untere Konfgr.	obere Konfgr.
Modellgleichung	Vmin= 15,36921*log(abs. Radius)-3,47571	x
Anz. Gültiger Fälle	884	
Varianz	0,48	
Bestimmtheitsmaß	0,69	
a	15,36921	16,43041
c	3,47571	8,67120

sportlich links

	untere Konfgr.	obere Konfgr.
Modellgleichung	Vmin= 17,77727*log(abs. Radius)-8,15862	x
Anz. Gültiger Fälle	481	
Varianz	0,44	
Bestimmtheitsmaß	0,66	
a	17,77727	19,59527
c	8,15862	17,11700

Untersuchung nach Öffnungswinkel/ Richtungsänderung

entspannt links

	x	untere Konfgr.	obere Konfgr.	Varianz	R	Anz. Gültiger Fälle
Öffnungswinkel						
<30 gon	0,44	-0,16	1,05	0,34	0,59	452
30- 60 gon	-0,57	-1,2	0,05	0,43	0,66	389
>60 gon	0,1	-0,78	0,98	0,59	0,77	224
KU						
<100 gon pro km	0,42	-0,19	1,03	0,42	0,65	425
100- 200 gon pro km	-1,44	-2,69	-0,2	0,25	0,5	126
>200 gon pro km	0,03	-1,14	1,2	0,62	0,79	122
KU_gew						
<100 gon pro km	0,35	-0,32	1,03	0,47	0,68	336
100- 200 gon pro km	0,21	-0,72	1,14	0,21	0,45	213
>200 gon pro km	-1,31	-2,49	-0,14	0,54	0,73	124
Fahrbahnbreite						
< 6 m	-0,84	-1,37	-0,32	0,61484046-	0,78	574
> 6 m	0,83	0,3	1,36	0,35	0,59	489

normal links

	x	untere Konfgr.	obere Konfgr.	Varianz	R	Anz. Gültiger Fälle
Öffnungswinkel						
<30 gon	0,38	-0,4	1,17	0,25	0,5	445
30- 60 gon	-0,04	-0,82	0,73	0,39	0,62	288
>60 gon	-0,6	-1,71	0,51	0,58	0,76	153
KU						
<100 gon pro km	0,57	-0,22	1,35	0,38	0,62	326
100- 200 gon pro km	0,29	-0,99	1,36	0,43	0,66	110
>200 gon pro km	-2,61	-4,23	-1	0,32	0,56	111
KU_gew						
<100 gon pro km	0,61	-0,29	1,51	0,44	0,66	257
100- 200 gon pro km	0,87	-0,17	1,92	0,3	0,55	170
>200 gon pro km	-3,14	-4,59	-1,7	0,29	0,53	120
Fahrbahnbreite						
< 6 m	-0,86	-1,58	-0,14	0,5	0,71	477
> 6 m	1,01	0,36	1,66	0,34	0,58	407

sportlich links

	x	untere Konfgr.	obere Konfgr.	Varianz	R	Anz. Gültiger Fälle
Öffnungswinkel						
<30 gon	0,52	-0,7	1,75	0,23	0,48	256
30- 60 gon	1,04	-0,28	2,37	0,29	0,54	155
>60 gon	-3,35	-5,33	-1,37	0,46	0,68	72
KU						
<100 gon pro km	-0,71	-2,02	0,59	0,38	0,62	169
100- 200 gon pro km	1,34	-1,57	4,25	0,37	0,61	51
>200 gon pro km	1,36	-1,43	4,14	0,23	0,48	46
KU_gew						
<100 gon pro km	-0,7	-2,18	0,78	0,42	0,64	138
100- 200 gon pro km	1,84	-0,28	3,97	0,28	0,53	82
>200 gon pro km	-0,96	-3,53	1,6	0,28	0,53	46
Fahrbahnbreite						
< 6 m	-1,2	-2,45	0,04	0,42	0,65	236
> 6 m	1,16	0,09	2,23	0,37	0,61	245

entspannt rechts

	x	untere Konfgr.	obere Konfgr.	Varianz	R	Anz. Gültiger Fälle
Öffnungswinkel						
<30 gon	0,68	-0,02	1,37	0,24	0,49	513
30- 60 gon	0,21	-0,45	0,86	0,36	0,6	350
>60 gon	-1,49	-2,29	-0,69	0,61	0,78	228
KU						
<100 gon pro km	0,83	0,08	1,59	0,52	0,72	289
100- 200 gon pro km	-0,19	-0,91	0,52	0,39	0,62	301
>200 gon pro km	1,97	0,76	3,18	0,41	0,64	128
KU_gew						
<100 gon pro km	0,99	0,27	1,71	0,5	0,71	329
100- 200 gon pro km	0,74	-0,1	1,58	0,25	0,5	225
>200 gon pro km	-0,35	-1,35	0,64	0,51	0,71	164
Fahrbahnbreite						
< 6 m	-1,34	-1,87	-0,8	0,57	0,75	674
> 6 m	2,26	1,65	2,87	0,37	0,6	416

entspannt rechts

	untere Konfgr.	obere Konfgr.
Modellgleichung	Vmin= 14,47256*log(abs. Radius)-5,44764+x	
Anz. Gültiger Fälle	1089	
Varianz	0,53	
Bestimmtheitsmaß	0,73	
a	14,47256	13,65570
c	5,44764	1,52142
		15,28941
		9,37387

normal rechts

	untere Konfgr.	obere Konfgr.
Modellgleichung	Vmin= 15,02977*log(abs. Radius)-2,39712+x	
Anz. Gültiger Fälle	906	
Varianz	0,48	
Bestimmtheitsmaß	0,69	
a	15,02977	14,00189
c	2,39712	-2,63019
		16,05765
		7,42443

sportlich rechts

	untere Konfgr.	obere Konfgr.
Modellgleichung	Vmin= 18,47460*log(abs. Radius)-12,94691+x	
Anz. Gültiger Fälle	477	
Varianz	0,47	
Bestimmtheitsmaß	0,69	
a	18,47460	16,72169
c	12,94691	4,33362
		20,22751
		21,56019

normal rechts

	x	untere Konfgr.	obere Konfgr.	Varianz	R	Anz. Gültiger Fälle
Öffnungswinkel						
<30 gon	0,36	-0,41	1,12	0,26	0,51	463
30- 60 gon	0,58	-0,32	1,48	0,37	0,61	290
>60 gon	-1,71	-2,78	-0,64	0,56	0,75	155
KU						
<100 gon pro km	0,28	-0,75	1,3	0,49	0,7	221
100- 200 gon pro km	0,62	-0,25	1,5	0,25	0,5	223
>200 gon pro km	0,91	-0,58	2,41	0,44	0,66	112
KU_gew						
<100 gon pro km	0,49	-0,46	1,44	0,47	0,69	251
100- 200 gon pro km	1,99	1	2,99	0,19	0,43	163
>200 gon pro km	-1,03	-2,28	0,23	0,43	0,65	142
Fahrbahnbreite						
< 6 m	-1,28	-2,02	-0,55	0,47	0,69	529
> 6 m	1,8	1,18	2,41	0,42	0,65	377

sportlich rechts

	x	untere Konfgr.	obere Konfgr.	Varianz	R	Anz. Gültiger Fälle
Öffnungswinkel						
<30 gon	0,5	-0,71	1,71	0,18	0,43	269
30- 60 gon	-0,08	-1,52	1,35	0,4	0,63	141
>60 gon	-0,95	-2,53	0,64	0,68	0,83	69
KU						
<100 gon pro km	2,02	0,32	3,72	0,53	0,73	112
100- 200 gon pro km	0,06	-1,32	1,44	0,35	0,59	117
>200 gon pro km	2,52	-0,22	5,27	0,4	0,63	49
KU_gew						
<100 gon pro km	1,85	0,35	3,35	0,51	0,71	135
100- 200 gon pro km	2,14	0,5	3,79	0,28	0,53	87
>200 gon pro km	-1,43	-3,81	0,96	0,44	0,66	56
Fahrbahnbreite						
< 6 m	-2,55	-3,73	-1,38	0,46	0,68	249
> 6 m	2,79	1,78	3,8	0,41	0,64	228

entspannt L+R

		untere Konfgr.	obere Konfgr.
Modellgleichung	Vmin= 14,62271*log(abs. Radius)-5,78113+x		
Anz. Gültiger Fälle	2152		
Varianz	0,54		
Bestimmtheitsmaß	0,73		
a	14,62271	14,05123	15,19419
c	5,78113	3,03845	8,52381

normal L+R

		untere Konfgr.	obere Konfgr.
Modellgleichung	Vmin= 15,21269*log(abs. Radius)-3,02246+x		
Anz. Gültiger Fälle	1789		
Varianz	0,48		
Bestimmtheitsmaß	0,69		
a	15,21269	14,47882	15,94657
c	3,02246	-0,56879	6,61371

sportlich L+R

		untere Konfgr.	obere Konfgr.
Modellgleichung	Vmin= 18,19683*log(abs. Radius)-10,92904+x		
Anz. Gültiger Fälle	957		
Varianz	0,46		
Bestimmtheitsmaß	0,68		
a	18,19683	16,93915	19,45452
c	10,92904	4,73998	17,11810

entspannt L+R

	x	untere Konfgr.	obere Konfgr.	Varianz	R	Anz. Gültiger Fälle
Öffnungswinkel						
<30 gon	0,54	0,08	0,99	0,29	0,54	964
30- 60 gon	-0,19	-0,63	0,25	0,42	0,65	738
>60 gon	-0,75	-1,33	-0,17	0,61	0,78	451
KU						
<100 gon pro km	0,6	0,15	1,05	0,49	0,7	712
100- 200 gon pro km	-0,87	-1,44	-0,3	0,39	0,63	425
>200 gon pro km	0,73	0	1,46	0,62	0,79	248
KU_gew						
<100 gon pro km	0,66	0,18	1,14	0,5	0,71	664
100- 200 gon pro km	0,33	-0,24	0,91	0,27	0,52	436
>200 gon pro km	-1,07	-1,72	-0,42	0,6	0,78	286
Fahrbahnbreite						
< 6 m	-1,04	-1,43	-0,65	0,57	0,76	1250
> 6 m	1,48	1,1	1,87	0,38	0,62	903

normal L+R

	x	untere Konfgr.	obere Konfgr.	Varianz	R	Anz. Gültiger Fälle
Öffnungswinkel						
<30 gon	0,35	-0,2	0,89	0,26	0,51	907
30- 60 gon	0,18	-0,39	0,75	0,4	0,63	576
>60 gon	-1,36	-2,06	-0,65	0,61	0,78	306
KU						
<100 gon pro km	0,47	-0,14	1,08	0,45	0,67	546
100- 200 gon pro km	0,25	-0,42	0,91	0,36	0,6	331
>200 gon pro km	-1,13	-2,16	-0,1	0,41	0,64	221
KU_gew						
<100 gon pro km	0,52	-0,12	1,16	0,47	0,69	507
100- 200 gon pro km	1,25	0,58	1,92	0,3	0,55	331
>200 gon pro km	-2,26	-3,13	-1,39	0,4	0,64	260
Fahrbahnbreite						
< 6 m	-1,07	-1,59	-0,56	0,48	0,69	1006
> 6 m	1,38	0,94	1,82	0,39	0,62	783

sportlich L+R

	x	untere Konfgr.	obere Konfgr.	Varianz	R	Anz. Gültiger Fälle
Öffnungswinkel						
<30 gon	0,46	-0,4	1,31	0,22	0,46	524
30- 60 gon	0,38	-0,57	1,34	0,37	0,61	294
>60 gon	-2,53	-3,66	-1,41	0,62	0,79	139
KU						
<100 gon pro km	0,48	-0,54	1,5	0,46	0,68	280
100- 200 gon pro km	-0,15	-1,38	1,08	0,4	0,63	166
>200 gon pro km	1,44	-0,36	3,24	0,37	0,61	93
KU_gew						
<100 gon pro km	0,51	-0,52	1,55	0,47	0,69	272
100- 200 gon pro km	1,71	0,45	2,98	0,31	0,56	167
>200 gon pro km	-1,82	-3,38	-0,25	0,42	0,65	100
Fahrbahnbreite						
< 6 m	-1,88	-2,74	-1,01	0,44	0,66	485
> 6 m	1,93	1,2	2,66	0,4	0,63	472

2. Ergebnisse des Tests auf gleiche Grundgesamtheit zwischen den Querschnittsmessungen und Verfolgungsfahrten

Messstrecke	Station	Richtung	V-fahrten	Q-messungen
S 238	0+415,00	Lichtenwalde	V85 = 79 km/h V50 = 72 km/h V15 = 61 km/h	V85 = 75 km/h V50 = 66 km/h V15 = 58 km/h
S 238	0+415,00	Niederwiesa	V85 = 85 km/h V50 = 80 km/h V15 = 69 km/h	V85 = 87 km/h V50 = 79 km/h V15 = 69 km/h
B 92	0+378,00	Oelsnitz i.V.	V85 = 90 km/h V50 = 79 km/h V15 = 70 km/h	V85 = 86 km/h V50 = 76 km/h V15 = 68 km/h
B 92	0+378,00	Adorf	V85 = 82 km/h V50 = 72 km/h V15 = 67 km/h	V85 = 82 km/h V50 = 73 km/h V15 = 65 km/h
B 92	0+748,00	Oelsnitz i.V.	V85 = 81 km/h V50 = 69 km/h V15 = 63 km/h	V85 = 77 km/h V50 = 69 km/h V15 = 63 km/h
B 92	0+748,00	Adorf	V85 = 80 km/h V50 = 68 km/h V15 = 63 km/h	V85 = 79 km/h V50 = 70 km/h V15 = 63 km/h

Tab. 20: Vergleich der Quantilsgeschwindigkeiten aus Verfolgungsfahrten und Querschnittsmessungen Brieske (2000)

Strecke	Station	Richtung	V
S 238	0+415	Li.	+
S 238	0+415	NDW	+
B 92	0+378	Oe	+
B 92	0+378	Ad	+
B 92	0+748	Oe	+
B 92	0+748	Ad	-

+: entstammen der gleichen Grundgesamtheit
 -: entstammen nicht der gleichen Grundgesamtheit

Tab. 21: Prüfung auf Zugehörigkeit zur „gleichen Grundgesamtheit“ Brieske (2000)

Strecke	Station	Richtung	V	Q
S 238	0+415	Li.	+	-
S 238	0+415	NDW	+	+
B 92	0+378	Oe	+	+
B 92	0+378	Ad	+	+
B 92	0+748	Oe	+	-
B 92	0+748	Ad	-	+

V: Verfolgungsfahrten

Q: Querschnittsmessungen

Li: Richtung Lichtenwalde

NDW: Richtung Niederwiesa

Oe: Richtung Oelsnitz

Ad: Richtung Adorf

+: die Normalverteilung ist nicht abzulehnen

-: Normalverteilung muss abgelehnt werden

Tab. 22: Prüfung auf Normalverteilung mit Hilfe des Kolmogoroff - Smirnof - Einstichproben - Anpassungstests Brieske (2000)

3. Definition der Elemente

Element	Bedingung
Gerade (G)	<ul style="list-style-type: none"> • Krümmung am Punkt gleich Krümmung des Punktes vorher oder • Radius ist größer als definierter größter Radius max_R
Kreisbogen (K)	<ul style="list-style-type: none"> • Krümmung am Punkt gleich Krümmung des Punktes vorher und • Radius ist kleiner als definierter größter Radius max_R
Einleitende Klothoide (EK)	Radius ist kleiner als Radius des Punktes vorher
Ausleitende Klothoide (AK)	Radius ist größer als Radius des Punktes vorher

4. Bildung der Abschnitte

In der ersten Stufe erfolgt die Einteilung nur in Abhängigkeit der Längen. Dafür werden folgende Kriterien Werte definiert:

- Mindestlänge für einen Abschnitt L_{min}
- Maximale Länge für einen Abschnitt L_{max}
- Maximale Länge eines nachfolgenden Abschnittes (L_{addmax}) um mit dem vorherigen Abschnitt zusammengefasst zu werden, obwohl dieser bereits die maximale Länge L_{max} erreicht hat.

Mit diesen Kriterien können Abschnitte wie folgt gebildet werden:

- a) Ist das Element bereits länger als die Mindestlänge für einen Abschnitt, bleibt dieses Element als eigenständiger Abschnitt stehen
- b) Sind zwei aufeinanderfolgende Elemente kürzer als
 - die Mindestabschnittslänge L_{min} und
 - die Summe der Länge aus beiden Abschnitten kleiner als die maximale Abschnittslänge L_{max}
 werden die beiden Elemente zu einem Abschnitt zusammengefasst.
- c) Ist die Länge eines nachfolgenden Elementes
 - kürzer als die Mindestlänge für einen Abschnitt L_{min} und
 - die Summe der Längen aus dem vorherigen Abschnitt und dem Element größer als L_{max} ist sowie
 - die Länge des Elementes kleiner als L_{addmax}

dann wird das Element trotzdem mit dem vorherigen Abschnitt zusammengefasst.

Auf Grundlage dieser Längenkriterien kann eine erste Abschnittsbildung erfolgen. Bei dieser Stufe dürfen die Längen nicht zu groß gewählt werden, da sonst Inhomogene Streckenabschnitte entstehen können. Am Ende dieser Stufe liegt eine Einteilung vor, welche die Elemente auf Grund ihrer Länge zusammenfasst.

Abschnittseinteilung Stufe 2:

Es wurden zwei zusätzliche Prüfparameter eingeführt. Es erfolgt eine weitere Zusammenfassung nach folgenden Bedingungen:

- Befindet sich zwischen zwei Singularitäten ein kurzer Abschnitt, der nicht länger als $L_{Dist,Sing}$ ist, werden diese drei Abschnitte zu einem Kurvigkeitsabschnitt zusammengefasst.
- Ist der Unterschied in der Kurvigkeit zweier aufeinanderfolgender Kurvigkeitsabschnitte geringer als die KU_{min} werden diese Abschnitte ebenfalls zusammengefasst.

5. Modell zur Ermittlung des Zeitpunktes zum setzen der neuen Wunschgeschwindigkeit

Der Bremsweg lässt sich wie folgt abschätzen:

1) Reglertotzeit

$$S_0 = \frac{v_{\text{Ausgang}}}{t_{\text{tot}}}$$

S_0 = Weg während der Reglertotzeit

v_{Ausgang} = Ausgangsgeschwindigkeit [m/s]

t_{tot} = Reglertotzeit [s]

2) Aufbau der Beschleunigung

$$t_{\text{Aufbau}} = \frac{a_{\text{max}}}{a_{\text{Aufbau}}}$$

$$v_1 = v_{\text{Ausgang}} - \frac{a_{\text{max}}}{2} \cdot t_{\text{Aufbau}}$$

$$S_1 = \frac{v_{\text{Ausgang}}^2 - v_1^2}{2 \cdot \frac{a_{\text{max}}}{2}}$$

t_{Aufbau} = Zeit zum Aufbau der Beschleunigung [s]

a_{max} = maximale Verzögerung [m/s²]

a_{Aufbau} = Aufbauwert der Verzögerung [m/s³]

v_{Ausgang} = Ausgangsgeschwindigkeit [m/s]

v_1 = Geschwindigkeit am Ende der Aufbauphase [m/s]

S_1 = Weg der Aufbauphase [m]

3) Abbau der Beschleunigung

$$t_{\text{Abbau}} = 2 \text{ s}$$

$$v_3 = v_{\text{Ziel}} + \frac{a_{\text{max}}}{2} \cdot t_{\text{Abbau}}$$

$$S_3 = \frac{v_3^2}{2 \cdot \frac{a_{\text{max}}}{2}}$$

t_{Abbau} = Zeit zum Abbau der Verzögerung [s]

v_3 = Geschwindigkeit am Ende der konstanten Verzögerung [m/s]

S_3 = Weg beim Abbau der Verzögerung [m]

4) Konstante Beschleunigung

$$\Delta v = v_1 - v_3$$

$$S_2 = \frac{v_1^2 - v_3^2}{2 \cdot a_{\text{max}}}$$

Δv = Geschwindigkeitsdifferenz für Verzögerung mit a_{max} [m/s]

S_2 = Weg während der konstanten Verzögerung [m]

Der Gesamtbremsweg lässt sich durch Addition der vier Einzelanteile ermitteln.

6. Fragebögen

Fragebogen vor Beginn der Fahrt (Erfassung der Persönlichkeitsmerkmale)

Startfragebogen Probandenfahrt SC System

9999

Persönliche Angaben:

Alter:

Geschlecht

-

Beruf

Treiben Sie regelmäßig Sport?

☐ ja ☐ nein

Tragen Sie eine Brille?

☐ ja ☐ nein

Rauchen Sie?

☐ ja ☐ nein

Wie häufig trinken Sie Kaffee?

☐ nie ☐ selten ☐ oft

Nehmen Sie regelmäßig
Medikamente?

☐ ja ☐ nein

eigener Pkw:

Leistung des am
meisten genutzten
Pkw:

PS

Fahrleistung: km/Jahr

Fahrpraxis

Jahre

Wie oft fahren Sie Fahrzeuge der Oberklasse

☐ immer ☐ selten ☐ nie

Startfragebogen Probandenfahrt SC System

9999

schlecht ausgezeichnet

Wie schätzen Sie Ihr Können beim Autofahren ein?

☐ 1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7

Wie ist Ihr Orientierungssinn beim Autofahren?

☐ 1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7

Wie ist Ihre Reaktionsfähigkeit beim Autofahren?

☐ 1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7

trifft nicht zu

trifft zu

Mir macht Autofahren Spaß

☐ 1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7

Ich habe Angst vorm Autofahren

☐ 1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7

Ich habe Angst vor diesem Experiment

☐ 1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7

Ich habe Angst vor Geschwindigkeit

☐ 1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7

Startfragebogen Probandenfahrt SC System

9999

Bitte geben Sie an, inwiefern die folgenden Aussagen auf Sie zutreffen

Ich fahre in der Stadt immer mit dem Auto	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	In der Stadt fahre ich nie mit dem Auto
Ich fahre lieber selbst	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Ich fahre lieber als Beifahrer
Ich empfinde das Verkehrsgeschehen als hektisch	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Ich empfinde das Verkehrsgeschehen gemächlich
Ich fahre schnell und sportlich	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Ich fahre langsam und zurückhaltend
Ich vermeide beim Fahren prinzipiell jedes Risiko	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Ich nutze beim Fahren jede Gelegenheit, um schneller voranzukommen
Ich beherrsche mein Fahrzeug vollkommen	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Ich habe häufig Schwierigkeiten, mit dem Fahrzeug zurechtzukommen
Ich finde mich leicht in fremden Fahrzeugen zurecht	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Es fällt mir schwer, in einem fremden Fahrzeug zurechtzukommen
Ich fahre spritsparend	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Ich lasse mich durch den Benzinverbrauch in meiner Fahrweise
Ich erfasse komplizierte Verkehrssituationen sehr schnell	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Ich erfasse komplizierte Verkehrssituation sehr langsam
Lange Strecken (>500 km) fahre ich lieber mit dem Auto	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Für lange Strecken (>500 km) nutze ich lieber die Bahn oder das Flugzeug
Ich bin an technischen Dingen rund um das Auto interessiert	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Ich habe kein Interesse an technischen Dingen rund um das Auto

Startfragebogen Probandenfahrt SC System

Bitte geben Sie an, inwiefern die folgenden Aussagen auf Sie zutreffen

Das Fahren auf kurvigen Bergstrecken macht mir am meisten Spaß	<input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/>	Ich fahre am liebsten auf geraden, komfortablen Autobahnen
Ich habe keine Bedenken, im Parkverbot zu parken	<input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/>	Ich halte mich streng an Parkverbote
Ich fahre häufig Auto, wenn ich Alkohol getrunken habe	<input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/>	Ich fahre nie Auto, wenn ich Alkohol getrunken habe
Autofahren betrachte ich als notwendiges Übel	<input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/>	Autofahren macht mir Spaß
Ich beschleunige mein Auto sehr stark	<input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/>	Ich beschleunige mein Auto verhalten
Geschwindigkeitsbeschränkungen halte ich strikt ein	<input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/>	Ich richte meine Geschwindigkeit nach meiner eigenen Einschätzung
Ich reagiere schneller als ein durchschnittlicher Fahrer	<input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/>	Ich reagiere langsamer als ein durchschnittlicher Fahrer

Startfragebogen Probandenfahrt SC System

0

Bitte geben Sie an, inwiefern die folgenden Aussagen auf Sie zutreffen

	sehr	ziemlich	eher	eher	ziemlich	sehr	
gesprächig	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 4	<input type="radio"/> 5	<input type="radio"/> 6	schweigsam
reizbar	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 4	<input type="radio"/> 5	<input type="radio"/> 6	gutmütig
gründlich	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 4	<input type="radio"/> 5	<input type="radio"/> 6	unsorgfältig
verletzlich	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 4	<input type="radio"/> 5	<input type="radio"/> 6	robust
künstlerisch	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 4	<input type="radio"/> 5	<input type="radio"/> 6	unkünstlerisch
zurückhaltend	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 4	<input type="radio"/> 5	<input type="radio"/> 6	kontaktfreudig
nachsichtig	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 4	<input type="radio"/> 5	<input type="radio"/> 6	barsch
ungeordnet	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 4	<input type="radio"/> 5	<input type="radio"/> 6	geordnet
selbstzufrieden	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 4	<input type="radio"/> 5	<input type="radio"/> 6	selbstmitleidig
unkreativ	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 4	<input type="radio"/> 5	<input type="radio"/> 6	kreativ
anschlussbedürftig	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 4	<input type="radio"/> 5	<input type="radio"/> 6	einzelgängerisch
selbstsüchtig	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 4	<input type="radio"/> 5	<input type="radio"/> 6	selbstlos
übergenau	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 4	<input type="radio"/> 5	<input type="radio"/> 6	ungenau
überempfindlich	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 4	<input type="radio"/> 5	<input type="radio"/> 6	entspannt
originell	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 4	<input type="radio"/> 5	<input type="radio"/> 6	konventionell
zurückgezogen	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 4	<input type="radio"/> 5	<input type="radio"/> 6	gesellig
friedfertig	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 4	<input type="radio"/> 5	<input type="radio"/> 6	streitsüchtig
nachlässig	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 4	<input type="radio"/> 5	<input type="radio"/> 6	gewissenhaft
gefühlsstabil	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 4	<input type="radio"/> 5	<input type="radio"/> 6	labil
phantasielos	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 4	<input type="radio"/> 5	<input type="radio"/> 6	phantasievoll

Fragebogen nach einer Testfahrt mit dem SC - System

Wie fühlen Sie sich im Moment...

überhaupt nicht

sehr

gut gelaunt?

<input type="radio"/>	1	<input type="radio"/>	2	<input type="radio"/>	3	<input type="radio"/>	4	<input type="radio"/>	5	<input type="radio"/>	6
-----------------------	---	-----------------------	---	-----------------------	---	-----------------------	---	-----------------------	---	-----------------------	---

energiegeladen?

<input type="radio"/>	1	<input type="radio"/>	2	<input type="radio"/>	3	<input type="radio"/>	4	<input type="radio"/>	5	<input type="radio"/>	6
-----------------------	---	-----------------------	---	-----------------------	---	-----------------------	---	-----------------------	---	-----------------------	---

müde?

<input type="radio"/>	1	<input type="radio"/>	2	<input type="radio"/>	3	<input type="radio"/>	4	<input type="radio"/>	5	<input type="radio"/>	6
-----------------------	---	-----------------------	---	-----------------------	---	-----------------------	---	-----------------------	---	-----------------------	---

unterfordert?

<input type="radio"/>	1	<input type="radio"/>	2	<input type="radio"/>	3	<input type="radio"/>	4	<input type="radio"/>	5	<input type="radio"/>	6
-----------------------	---	-----------------------	---	-----------------------	---	-----------------------	---	-----------------------	---	-----------------------	---

unkonzentriert?

<input type="radio"/>	1	<input type="radio"/>	2	<input type="radio"/>	3	<input type="radio"/>	4	<input type="radio"/>	5	<input type="radio"/>	6
-----------------------	---	-----------------------	---	-----------------------	---	-----------------------	---	-----------------------	---	-----------------------	---

heiter?

<input type="radio"/>	1	<input type="radio"/>	2	<input type="radio"/>	3	<input type="radio"/>	4	<input type="radio"/>	5	<input type="radio"/>	6
-----------------------	---	-----------------------	---	-----------------------	---	-----------------------	---	-----------------------	---	-----------------------	---

unsicher?

<input type="radio"/>	1	<input type="radio"/>	2	<input type="radio"/>	3	<input type="radio"/>	4	<input type="radio"/>	5	<input type="radio"/>	6
-----------------------	---	-----------------------	---	-----------------------	---	-----------------------	---	-----------------------	---	-----------------------	---

frisch?

<input type="radio"/>	1	<input type="radio"/>	2	<input type="radio"/>	3	<input type="radio"/>	4	<input type="radio"/>	5	<input type="radio"/>	6
-----------------------	---	-----------------------	---	-----------------------	---	-----------------------	---	-----------------------	---	-----------------------	---

verärgert?

<input type="radio"/>	1	<input type="radio"/>	2	<input type="radio"/>	3	<input type="radio"/>	4	<input type="radio"/>	5	<input type="radio"/>	6
-----------------------	---	-----------------------	---	-----------------------	---	-----------------------	---	-----------------------	---	-----------------------	---

erschöpft?

<input type="radio"/>	1	<input type="radio"/>	2	<input type="radio"/>	3	<input type="radio"/>	4	<input type="radio"/>	5	<input type="radio"/>	6
-----------------------	---	-----------------------	---	-----------------------	---	-----------------------	---	-----------------------	---	-----------------------	---

gereizt?

<input type="radio"/>	1	<input type="radio"/>	2	<input type="radio"/>	3	<input type="radio"/>	4	<input type="radio"/>	5	<input type="radio"/>	6
-----------------------	---	-----------------------	---	-----------------------	---	-----------------------	---	-----------------------	---	-----------------------	---

gelangweilt?

<input type="radio"/>	1	<input type="radio"/>	2	<input type="radio"/>	3	<input type="radio"/>	4	<input type="radio"/>	5	<input type="radio"/>	6
-----------------------	---	-----------------------	---	-----------------------	---	-----------------------	---	-----------------------	---	-----------------------	---

Glauben Sie, die momentane Situation im Griff zu haben?

gar nicht

<input type="radio"/>	1	<input type="radio"/>	2	<input type="radio"/>	3	<input type="radio"/>	4	<input type="radio"/>	5	<input type="radio"/>	6	<input type="radio"/>	7
-----------------------	---	-----------------------	---	-----------------------	---	-----------------------	---	-----------------------	---	-----------------------	---	-----------------------	---

völlig

Bewerten Sie hier Ihre momentan erlebte Anstrengung, um die jetzt verübte Tätigkeit ausführen zu können.



außerordentlich anstrengend

sehr stark anstrengend

stark anstrengend

ziemlich anstrengend

einigermaßen anstrengend

etwas anstrengend

kaum anstrengend

Im Vergleich zu Fahrten ohne SC ist das Fahren mit SC weniger anstrengend

☐ 1 ☒ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6

Der Inhalt der Systemmeldung ist verständlich

☐ 1 ☒ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6

Ich habe den Zeitpunkt, wann eine Systemmeldung dargeboten wird, verstanden

☐ 1 ☒ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6

Ich wurde durch die Darbietung der Systemmeldung zusätzlich beansprucht

☐ 1 ☒ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6

Durch das SC mußte ich mich weniger stark auf das Fahren konzentrieren

☐ 1 ☒ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6

Die Nutzung des SC hat meine Fahrsicherheit erhöht

☐ 1 ☒ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6

Das SC ist eine sinnvolle Fahrhilfe bei der Geschwindigkeits- und Abstandswahl

☐ 1 ☒ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6

Während der Fahrt konnte ich vollkommen dem System vertrauen

☐ 1 ☒ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6

Durch die Systemmeldungen hatte ich mehr Spaß beim Fahren

☐ 1 ☒ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6

Bei Fahrten mit SC reagiert man schneller auf mögliche Gefahrensituationen als bei Fahrten ohne SC

☐ 1 ☒ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6

Das System soll mich auf Geschwindigkeitsüberschreitungen aufmerksam machen

☐ 1 ☒ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6

Ich war mir im Klaren, ob das System eine Kurve/ eine Geschwindigkeitsbegrenzung/ ein Ortseingangsschild erkannt hat oder nicht

☐ 1 ☒ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6

	zu gering	genau richtig	zu hoch
Die Geschwindigkeit auf Geraden ist	<input type="radio"/> 1 <input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input checked="" type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7		
Die Geschwindigkeit in den Kurven ist	<input type="radio"/> 1 <input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input checked="" type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7		
Die Geschwindigkeit bei unübersichtlichem Straßenverlauf ist	<input type="radio"/> 1 <input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input checked="" type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7		
Die Geschwindigkeit am Ortsanfang ist	<input type="radio"/> 1 <input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input checked="" type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7		
Die vom System gewählte Beschleunigung ist	<input type="radio"/> 1 <input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7		
Die vom System gewählte Verzögerung	<input type="radio"/> 1 <input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7		

	zu früh	genau richtig	zu spät
Die Systemmeldung über ein Tempolimit ist	<input type="radio"/> 1 <input type="radio"/> 2 <input checked="" type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7		
Die Systemmeldung über einen Ortseingang	<input type="radio"/> 1 <input type="radio"/> 2 <input checked="" type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7		
Die Systemmeldung über einen Ortsausgang	<input type="radio"/> 1 <input type="radio"/> 2 <input checked="" type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7		
Die Systemmeldung vor einer Kurve	<input type="radio"/> 1 <input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input checked="" type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7		
Systemausfälle habe ich erkannt	<input type="radio"/> 1 <input checked="" type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7		

	trifft zu	trifft nicht zu
Das SC halte ich für gebrauchstauglich	<input type="radio"/> 1 <input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6	
Die Verkehrssicherheit ist für das SC gegeben	<input type="radio"/> 1 <input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6	
Mit dem SC System fühlte ich mich machtlos	<input type="radio"/> nie <input type="radio"/> selten <input type="radio"/> oft <input type="radio"/> immer	
Wünschen Sie sich vom System unterschiedliche Rückmeldungen bei Kurvenwarnung im Gegensatz zu Tempolimits ?		<input type="radio"/> ja <input type="radio"/> nein
Wünschen Sie sich vom System ein anderes Bremsverhalten bei Kurvenwarnung im Gegensatz zu Tempolimits (nur Regelungsmodus)?		<input type="radio"/> ja <input type="radio"/> nein
Ich hatte während der Fahrt Angst, weil:		
Angst hatte ich keine, aber beunruhigt hat mich:		
Allgemeine Anmerkungen zum		